

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

КАПЛУН ПАВЛО ВІТАЛІЙОВИЧ

УДК 621.891

**НАУКОВО-ПРИКЛАДНІ ОСНОВИ
ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗВОДНЕВОГО ІОННОГО АЗОТУВАННЯ
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ КОНТАКТНОЇ МІЦНОСТІ ТРИБОСИСТЕМ**

05.02.04 – тертя та зношування в машинах

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Хмельницький – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Хмельницькому національному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Диха Олександр Володимирович,
Хмельницький національний університет,
завідувач кафедри зносостійкості
і надійності машин.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Аулін Віктор Васильович,
Центральноукраїнський національний
технічний університет,
професор кафедри експлуатації та ремонту машин;

доктор технічних наук, професор
Савуляк Валерій Іванович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри технології
підвищення зносостійкості;

доктор технічних наук, доцент
Марчук Володимир Єфремович,
Національний авіаційний університет (м. Київ),
професор кафедри логістики.

Захист відбудеться «14» травня 2018 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 70.052.02 у Хмельницькому національному університеті за адресою: 29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11, 3-й навчальний корпус, зал засідань.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Хмельницького національного університету за адресою: 29016, м. Хмельницький, вул. Кам'янецька, 110/1 та на сайті Хмельницького національного університету: www.khnu.km.ua.

Автореферат розісланий «30» березня 2018 р.

В.о. вченого секретаря
спеціалізованої вченої ради  Я. Т. Кіницький

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В техніці велика кількість деталей і вузлів машин та механізмів працюють при терті кочення. Переважаюча більшість деталей машин при коченні працюють з проковзуванням і їх вихід з ладу відбувається від зношування та руйнування поверхні викришуванням при контактній втомі металу. Підвищення їх довговічності має велике значення для народного господарства і є актуальною проблемою.

Найбільш раціональним шляхом підвищення контактної міцності, зносостійкості та довговічності трибосистем, що працюють в умовах тертя кочення і ковзання, є методи інженерії поверхні, зокрема, нанесення покриттів з модифікацією поверхневого шару та основи.

Аналіз науково-технічних вітчизняних та іноземних робіт, зокрема: В. Г. Карпенка, Б. І. Костецького, М. В. Кіндрачка, Б. С. Ковальського, В. В. Запорожця, В. М. Зінченка, В. Т. Трощенко, А. О. Лебедева, Б. А. Ляшенка, В. С. Іванової, В. Є. Паніна, В. І. Похмурського, В. В. Шевелі, К. Джонсона, Н. D. Вуї, J. A. Collins, A. J. Evily, G. A. Maugin та інших, показав, що зовнішні навантаження та агресивне середовище призводять до змін у будові поверхневих шарів матеріалу, і, як результат, до зміни контактної витривалості, зносостійкості та довговічності всієї конструкції.

Серед найбільш ефективних методів підвищення характеристик контактної витривалості та довговічності деталей є модифікація поверхневих шарів за допомогою цілеспрямованих технологічних впливів із застосуванням градієнтних покриттів оптимізованих за критеріями міцності і зносостійкості.

Важливим є створення таких технологій нанесення покриттів, які б максимально забезпечили вимоги комплексного врахування факторів при підвищенні контактної витривалості та зносостійкості деталей з покриттями при терті кочення. Проблема є актуальною, для її вирішення і спрямована дана робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати роботи є узагальненням досліджень, які виконувались відповідно до наступних держбюджетних тем: «Розроблення високоефективної енергозберігаючої технології зміцнення інструментів і оснащення в плазмі тліючого розряду» (2006–2007 рр., номер держреєстрації 0107U007317), автор – виконавець; «Підвищення зносостійкості та довговічності екструдерів при баро-термічній переробці зерна з добавками мінералів» (2013–2014 рр., номер держреєстрації 0113U002068), автор – виконавець; «Наукові підходи і технології підвищення зносостійкості та довговічності важконавантажених конструкційних елементів при циклічному контактному навантаженні» (2015–2017 рр., номер держреєстрації 0115U000226), автор – виконавець; «Наукові основи підвищення контактної витривалості та зносостійкості конструкційних елементів з покриттями при терті кочення» (2017–2019 рр., номер держреєстрації 0117U001167), автор – виконавець.

Мета та завдання дослідження. Мета роботи полягала у розробці трибологічних основ підвищення контактної витривалості та зносостійкості сталей з покриттями при терті кочення.

Для досягнення поставленої у роботі мети визначено та вирішено наступні основні задачі:

- проведено аналіз існуючих досліджень контактної витривалості конструкційних елементів при терті кочення;
- розробити метод підвищення контактної витривалості та зносостійкості сталей при терті кочення;
- провести дослідження властивостей сталей після іонного азотування в безводневих середовищах;
- провести теоретичні дослідження дифузії азоту в азотованих шарах після їх термоактивування;
- розробити технології іонного нітрогартування і оксинітрогартування та дослідити властивості поверхневих шарів сталей після їх застосування;
- дослідити вплив водню на фізико-механічні властивості та витривалість сталей при згині і контактному навантаженні;
- провести дослідження залишкових напружень в азотованих шарах та їх оптимізація для підвищення довговічності конструкційних елементів;
- розробити методикку експериментальних досліджень контактної витривалості і довговічності різних сталей з покриттями при терті кочення;
- провести порівняльні експериментальні дослідження контактної витривалості та зносостійкості сталей з різними покриттями в різних середовищах;
- порівняти результати експериментальних досліджень контактної витривалості та зносостійкості сталей в різних середовищах після іонного азотування та нітрогартування;
- розробити рекомендації з підвищення контактної витривалості та зносостійкості конструкційних елементів при терті кочення;
- провести промислову перевірку і впровадити розроблені рекомендації.

Об'єкт дослідження. Процес зношування та контактної витривалості сталей з покриттями при терті кочення.

Предмет дослідження. Закономірності впливу властивостей покриття і основи, залишкових напружень в покритті, технології нанесення покриття та середовища на контактну витривалість і зносостійкість композиції «покриття – основа».

Методи дослідження. Теоретичні дослідження термоактивації азотованих шарів проводили з використанням положень термодинаміки. Для модифікації поверхонь застосовували наступні технології: іонне азотування в безводневих середовищах, іонне нітрогартування та іонне оксинітрогартування, а також вакуум-плазмове напилення та гальванічне осадження покриттів. Проводилося математичне планування експериментів з оптимізацією технологічних параметрів іонного азотування за критеріями максимальних значень експлуатаційних характеристик.

Для визначення залишкових напружень застосовані методи М. М. Давиденкова, гнучкого зразка, вдавлювання індентора. Для розрахунку напружено-деформованого стану композиції «покриття – основа» застосовано аналітичні методи механіки деформованого твердого тіла та чисельний метод скінченних елементів (метод графів).

При визначенні властивостей покриттів та основи використовувались методи фізичного матеріалознавства (хімічний аналіз, растрова електронна мікроскопія, фрактографічний аналіз, рентгенофазовий аналіз), вимірювання мікротвердості, а також експериментальні методи дослідження контактної витривалості та зносостійкості на розробленій універсальній установці.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше науково обґрунтовано і розроблено новий метод підвищення контактної витривалості та зносостійкості конструкційних елементів з покриттями при терті кочення. Метод включає: іонне азотування або іонне оксиазотування в безводневих середовищах за технологічними режимами, що забезпечують максимальну твердість та товщину азотованого шару; термоактивування азотованого шару в розплаві солей з певною витримкою в часі при температурі гартування для оптимізації властивостей покриття; наступне гартування та низькотемпературний відпуск для забезпечення високої твердості основи.

2. Вперше на основі експериментальних досліджень розроблено математичну модель визначення твердості в будь-якій точці по глибині азотованого шару залежно від технологічних параметрів процесу іонного азотування. Розроблено новий спосіб визначення твердості по товщині азотованого шару та експериментально-розрахункову методичку для його впровадження.

3. Вперше встановлена прямопропорційна залежність між мікротвердістю та залишковими напруженнями стиску в азотованих шарах після іонного азотування, на основі якої розроблено новий метод визначення залишкових напружень в будь-якій точці поперечного перерізу азотованого шару за показниками мікротвердості в цих точках.

4. Вперше розроблено комплексний критерій оцінки властивостей композиції «азотоване покриття – основа» та запропоновані його оптимальні значення для різних типів сталей і технологій нанесення покриттів, при яких досягається максимальне підвищення контактної витривалості конструкційних елементів з азотованими покриттями при терті кочення.

5. Отримані закономірності впливу технологічних параметрів процесу іонного азотування в безводневих середовищах на властивості та залишкові напруження в азотованому шарі ряду сталей. На основі оптимізації технологічних параметрів іонного азотування визначені оптимальні режими, що забезпечують максимальні значення товщини і твердості азотованого шару.

6. Отримані закономірності розподілу азоту та мікротвердості по товщині азотованого шару залежно від температури і часу його термоактивування. На

основи цих закономірностей розроблені нові технології іонного нітрогартування та оксинітрогартування, що забезпечують оптимальні властивості азотованого шару і твердості основи за критерієм максимальної контактної витривалості композиції «покриття – основа».

7. Отримані залежності кінетики зношування азотованих шарів в різних середовищах при різних навантаженнях і режимах іонного азотування та нітрогартування при коченні з проковзуванням.

8. Встановлена нелінійна залежність контактної витривалості від твердості основи різних сталей з покриттями та від вмісту залишкового аустеніту в структурі сталі X12M після нітрогартування.

9. Отримані порівняльні дані контактної витривалості різних сталей з покриттями, нанесеними за різними технологіями, в мастилі I-20 та порівняльні дані контактної витривалості сталі 40X після нітрогартування при випробуваннях в різних середовищах (мастилі I-20, абразивному, в дистильованій воді, в морській воді та при сухому терті).

10. Підтверджено, що контактна витривалість азотованих зразків при лінійному контакті менша порівняно з точковим контактом при ідентичних умовах випробувань, що обумовлено різними умовами роботи матеріалу при плоскому і об'ємному напружених станах на ділянці контакту.

11. Підтверджено негативний вплив водню на контактну витривалість сталей, що азотували в середовищах з воднем, який викликає зменшення контактної витривалості конструкційних елементів на 15–54 % порівняно з азотуванням в безводневих середовищах. При цьому негативний вплив водню зростає зі зменшенням легованості сталі.

Практичне значення одержаних в дисертації результатів.

1. Розроблені нові технології нітрогартування та оксинітрогартування підвищують контактну витривалість трибосистем при терті кочення в 1,9–2,2 рази порівняно з гартуванням.

2. Розроблені новий спосіб та експериментально-розрахункова методика визначення мікротвердості в будь-якій точці поперечного перерізу азотованого шару, що можуть бути застосовані в наукових дослідженнях.

3. Розроблена експериментально-розрахункова методика визначення залишкових напружень в азотованих шарах за показниками мікротвердості, яка може бути застосована в наукових дослідженнях та на виробництві.

4. Запропоновано комплексний критерій оцінки якості композиції «азотоване покриття – основа», який може використовуватися в виробництві для вибору оптимальних режимів зміцнення при нанесенні покриттів методом азотування на деталі машин, що працюють в умовах тертя кочення, а також для аналізу властивостей конструкційних елементів з покриттями з метою зменшення кількості експериментальних досліджень при випробуваннях.

5. Результати роботи впроваджені на промислових підприємствах: НВП ТОВ НВФ «Адвісмаш», ПАТ «Завод «Темп», ВП «Волочеський

машинобудівний завод» ПАТ «Мотор Січ», НВП «Віднова», ТОВ Р.І.Н.О., ДП «Красилівський агрегатний завод», а також в навчальний процес Хмельницького національного університету.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення та практичні результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, одержані здобувачем особисто. Роботи, виконані разом зі співавторами, наведені в переліку публікацій. З робіт, опублікованих у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем.

У дисертаційній роботі автором обґрунтовано загальну концепцію роботи, сформульовано мету і завдання досліджень та визначено підходи їх реалізації. Запропоновано методологію оптимізації дифузійних покриттів за критеріями контактної витривалості та зносостійкості; розвинене уявлення про створення системи «покриття – основа» з прогнозованою адаптацією робочих поверхонь за рахунок превентивної організації конструкції покриття для підвищення її довговічності; показана можливість керування напружено-деформованим станом та експлуатаційними характеристиками композиції «дифузійне покриття – основа» шляхом зміни технологічних параметрів процесу нанесення покриттів, що дозволяє підвищити її довговічність в різних середовищах.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень, викладені в дисертації, регулярно представлялися та обговорювалися на міжнародних, республіканських конференціях, симпозіумах, семінарах: міжнар. наук.-техн. конф. «Прогресивні технології життєвого циклу авіаційних двигунів і енергетичних установок» АР Крим, м. Алушта, 22–27 вересня, 2004, 2006, 2007; міжнар. наук.-техн. конф. «Машиностроение и техносфера XXI века», Севастополь, – 2005, 2006, 2007; міжнар. наук.-техн. конф. «Фізика конденсованих систем та прикладне матеріалознавство», Львів, 2007; 8 th Internationals symposium «Insycont» 10 «Energy and environmental aspects of tribology», Cracow, Poland, 2010; 10-та ювілейна конф. «Качество, стандартизация, контроль: теория и практика», Киев, 2010; 6-й міжнар. симп. по трибофатиці, ОІМ НАН Біларусії, Мінськ, 2010; міжнар. наук.-практ. конф. «Ольвійський форум – 2011», Ялта, 2011, 2012, 2015; міжнар. наук.-техн. конф. «Україно-Польський діалог», Яремче, 2011, 2013; міжнар. наук.-техн. конф. «Проблеми качества и долговечности зубчатых передач и механического привода», (ЗП-2015). Харків, 2015; міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові, 2015, 2017.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 54 наукові праці, у тому числі 5 колективних монографій, 24 статті у фахових виданнях, перелік яких затверджено Міністерством освіти і науки України, та 6 – в закордонних рецензованих періодичних виданнях з технічних наук; 16 публікацій у матеріалах міжнародних та національних конференцій; 7 наукових праць опубліковано без співавторів. Одержано 3 патенти України.

Структура і обсяг дисертації Дисертаційна робота складається з вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел і додатків. Обсяг анотації складає 25 сторінок. Дисертація має загальний обсяг 358 сторінок, включає 87 рисунків, 64 таблиці, список літератури з 408 найменувань і додатків на 18 сторінках. Обсяг основної частини дисертації становить 270 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обгрунтовано актуальність роботи, поставлені мета та завдання досліджень, визначені наукова новизна і практична значимість отриманих результатів, наведені дані щодо апробації і впровадження.

У **першому розділі** зроблено аналіз літературних даних за темою дисертаційної роботи і проведено обгрунтування актуальності та визначені основні напрямки досліджень.

На основі аналізу літературних даних з контактної взаємодії елементів трибосистем встановлено, що основним видом пошкоджень конструкційних елементів при терті кочення є викришування, яке відбувається через контактну втому матеріалу в результаті циклічної дії зовнішнього навантаження.

Дослідженням процесів контактної втоми при терті кочення присвячено ряд праць, в більшості яких розглядається робота однорідних матеріалів, що мають певні обмежені можливості з підвищення контактної витривалості при коченні. Одним із перспективних напрямків вирішення цієї проблеми є нанесення на поверхню зміцнювальних покриттів. На контактну витривалість конструкційних елементів з покриттями впливають ряд факторів, що залежать від властивостей композиції «покриття – основа», а саме: конструкції і технології нанесення покриттів, товщина, твердість і її градієнт по товщині, хімічний і фазовий склади, залишкові напруження в покритті, твердість основи та адгезійна міцність покриття і основи. Крім того великий вплив на контактну витривалість має середовище роботи і водень. Досліджень впливу цих факторів на зносостійкість і контактну витривалість конструкційних елементів з покриттями мало тому вони є актуальними.

Дослідження напружено-деформованого стану матеріалу з покриттями показали, що несучу здатність та довговічність конструкції при контактному навантаженні можна підвищити при застосуванні градієнтних покриттів, збільшенні модуля пружності і товщини покриття, зменшенні градієнта твердості по глибині, збільшення твердості основи. В даний час є велика кількість технологій для нанесення покриттів, кожна з яких має свої переваги та недоліки і забезпечує певні фактори. Тому перспективним є застосування в технологічному процесі інтегральних технологій з використанням кількох одинарних. На сьогодні, для підвищення контактної витривалості найбільш поширеними є технології ХТО – цементації та нітроцементації. Але вони

високотемпературні і застосовують водневомісткі середовища насичення, що негативно впливає на характеристики міцності і контактної витривалості.

Максимального підвищення контактної витривалості композиції «покриття – основа» при терті кочення можна досягнути при застосуванні інтегрального технологічного процесу її зміцнення за наступною концепцією: нанесення градієнтних покриттів з використанням низькотемпературних безводневих технологій з оптимальними властивостями покриття і залишковими напруженнями стиску і термічної обробки для забезпечення високої твердості основи.

Запропоновано новий метод підвищення контактної витривалості та зносостійкості конструкційних елементів з покриттями при терті кочення. Метод включає: іонне азотування або іонне оксиазотування в безводневих середовищах за технологічними режимами, що забезпечують максимальну твердість та товщину азотованого шару; термоактивування азотованого шару в розплаві солей з певною витримкою в часі при температурі гартування для оптимізації властивостей покриття; наступне гартування та низькотемпературний відпуск для забезпечення високої твердості основи.

У **другому розділі** наведені результати досліджень особливостей технології іонного азотування в безводневих середовищах (сумішах азоту з аргоном) та властивостей азотованих шарів після азотування ряду конструкційних сталей за різними технологічними режимами. Встановлено, що на відміну від іонного азотування в водневих середовищах (аміаку або сумішах азоту з воднем) дана технологія є екологічно чистою і виключає водневе окрихчення сталі. При цьому міняється кінетика процесу азотування, підвищується пластичність азотованого шару; в 1,3–1,5 рази знижується енергія активації процесу, що приводить до зменшення витрат електроенергії на 40 %. Технологічний процес добре керується 4-ма технологічними факторами (температурою, тиском, складом середовища і часом дифузійного насичення), що дозволяє суттєво змінювати властивості азотованого шару.

На основі застосування чотирифакторного планування експериментів одержані математичні залежності товщини і мікротвердості азотованого шару від технологічних параметрів процесу іонного азотування. Були визначені оптимальні режими зміцнення поверхні різних сталей (20, 20X13, 45, ШХ15, Х12М) за критерієм максимальних значень характеристик, що досліджували (табл. 1 та 2).

Таблиця 1

Оптимальні режими іонного азотування сталей, що забезпечують максимальне значення мікротвердості H_{\max} азотованого шару

№ з/п	Марка сталі	Режим іонного азотування				Мікротвердість азотованого шару H_{\max} , МПа
		T , °С	P , Па	τ , хв	об. % Ar, в суміші з N_2	
1	40X	570	160	75	57	9226
2	X12M	570	240	75	38	8818
3	20	580	160	75	50	7275

Оптимальні режими іонного азотування сталей,
що забезпечують максимальне значення товщини h_{\max} азотованого шару
у заданих межах зміни технологічних параметрів

№ з/п	Марка сталі	Режим іонного азотування				Товщина азотованого шару h_{\max} , мкм
		T , °C	P , Па	τ , хв	об. % Ar, в суміші з N_2	
1	40X	600	400	240	57	560,5
2	X12M	600	400	240	38	502,8
3	20	600	260	240	19	337,3

На основі одержаних рівнянь регресії і оптимальних режимів азотування сталей (табл. 1 та 2) побудовані графіки залежності товщини і мікротвердості від технологічних параметрів процесу азотування для кожної сталі. Приклад таких залежностей для сталі 20 наведений на рис. 1.

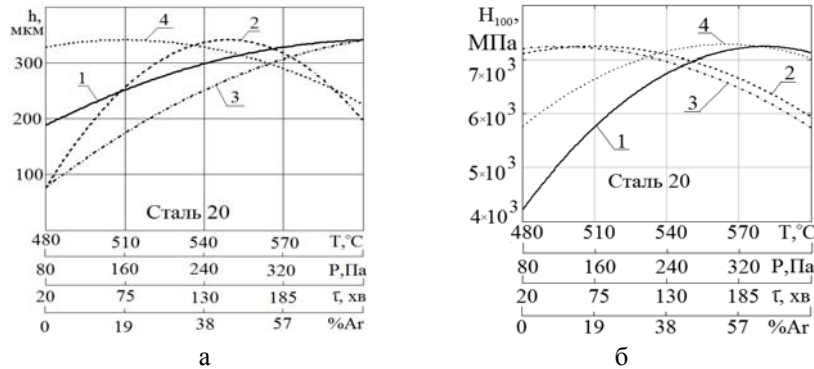


Рис. 1. Залежності товщини (а) і мікротвердості (б) азотованого шару від технологічних параметрів іонного азотування при оптимальних режимах

Всі технологічні параметри іонного азотування мають значний вплив на товщину і мікротвердість азотованого шару. Встановлено, що при іонному азотуванні в безводневих середовищах властивості азотованого шару (товщину, твердість, фазовий і хімічний склад та градієнт твердості по глибині) можна змінювати в широких межах за допомогою зміни технологічних параметрів. Самі ж технологічні параметри оптимізуються за різними критеріями і залежно від умов експлуатації.

Дослідження показали (табл. 3), що змінюючи режим іонного азотування сталі 40X, концентрація азоту в поверхневому шарі змінилася з 5,7 % до 9,2 % за рахунок зміни фазового складу. Пошаровий хімічний аналіз сталей 40X, 20X і X12M після іонного азотування у безводневому середовищі показав, що концентрація азоту в азотованому шарі різна для різних сталей і залежить як від хімічного складу сталі, так і від технологічних параметрів іонного азотування.

Вплив параметрів азотування на фазовий склад і концентрацію азоту в азотованому шарі сталі 40X

Назва складової та показника	Режим азотування								
	75 об.%N ₂ +25 об.%Ar, P = 240 Па, τ = 240 хв			T = 560 °C, P = 240 Па, τ = 240 хв			75 об.%N ₂ +25 об.%Ar, T = 560 °C, τ = 240 хв		
	Температура азотування, °C			Вміст Ar в суміші з N ₂ , об. %			Тиск, Па		
	580	560	520	19	38	57	80	240	400
(Fe _{2,3} N), ваг. %	23	28	36	33	24	18	11	30	51
(Fe ₄ N), ваг. %	56	57	44	48	53	65	45	45	34
α-Fe ₄ N ₃ , ваг. %	21	15	20	19	23	17	44	25	15
Вагов. % N ₂ в поверхневому шарі	7,4	7,2	7,0	7,1	6,8	6,2	5,3	7,2	8,1

Наявність аргону в середовищі насичення інтенсифікує процес катодного розпилення, що дозволяє отримувати азотовані шари з різною товщиною нітридної зони або без неї (рис. 2).

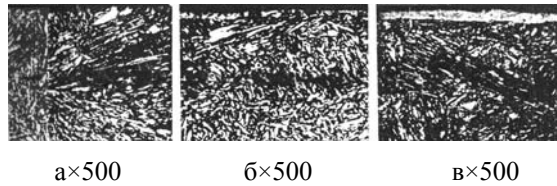


Рис. 2. Мікроструктура сталі 25X5M після іонного азотування (середовище 25 об.% N₂+75 об.% Ar, P = 65 Па, τ = 6 год) при різних температурах: а – 500 °C; б – 540 °C; в – 580 °C

На основі експериментальних досліджень розроблена математична модель розподілу твердості (1) та її градієнта (2) по глибині азотованого шару залежно від технологічних режимів іонного азотування:

$$H_i = H_0 + (H_{\max} \cdot k_4 - H_0) e^{-\frac{h_i}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (h_n - h_i)}} \quad (1)$$

Тоді градієнт твердості:

$$\frac{dH_i}{dh_i} = -(H_{\max} \cdot k_4 - H_0) \cdot e^{-\frac{h_i}{(h_n - h_i) \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}} \cdot \frac{1}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (h_n - h_i)}, \quad (2)$$

де H_0 – твердість основи; H_{\max} – твердість поверхні азотованого шару при оптимальному режимі азотування; H_i – твердість i -го шару на відстані h_i від поверхні; h_n – товщина азотованого шару; k_1, k_2, k_3, k_4 – коефіцієнти, що враховують вплив технологічних параметрів іонного азотування.

Використовуючи математичну модель впливу технологічних параметрів іонного азотування на твердість азотованого шару та значення мікротвердості поверхні при оптимальному технологічному режимі азотування, визначеному на основі планування експериментів, розроблено методику визначення мікротвердості в будь-якій точці перерізу азотованого шару сталі що досліджують, при будь-якому режимі іонного азотування. Достовірність результатів розрахунку за даною методикою перевірено на основі порівняння з даними експериментів інших дослідників. Відхилення розрахункових і експериментальних даних не перевищує 15 %.

У **третьому розділі** наведені результати дослідження впливу режимів іонного азотування в водневих і безводневих середовищах на фізико-механічні характеристики сталей Ст. 3, 40X, 65Г і 12X18Н10Т при розтягу, на багатоциклово і малоциклово втому сталей 20, 45, 45X, 38X2МЮА в різних середовищах та на фретинг-втому зі згином сталі 40X на повітрі.

Дослідження на розтяг проводилися на машині ІМАШ 20-78 із застосуванням мікроскопа і відеозапису динаміки процесу. Встановлено, що зародження мікротріщин відбувається як в нітридному шарі, так і під ним в місцях скупчення дислокацій (рис. 3а і 3б). При азотуванні в безводневому середовищі мікротріщини поширюються в покритті за косою лінією (рис. 3в). При азотуванні у водневому середовищі – перпендикулярно до поверхні (рис. 3г), аналогічно крихкому руйнуванню.

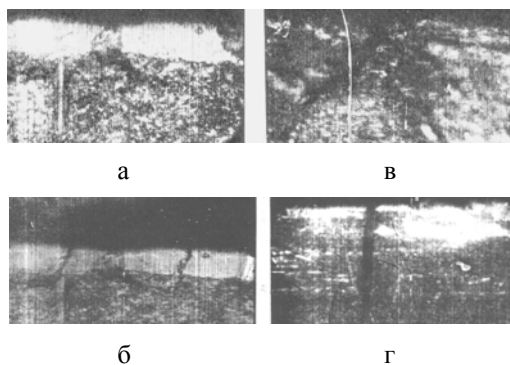


Рис. 3. Зародження і розвиток мікротріщин в азотованих зразках сталі 40X при розтягу: а, б – зародження мікротріщин в нітридному шарі; в, г – зародження і розвиток мікротріщин в зоні внутрішнього азотування і основі при іонному азотуванні в безводневому (в) і водневому (г) середовищах

При іонному азотуванні зразків досліджуваних сталей в безводневому середовищі підвищується границя міцності σ_s на 4–11 %, а характеристики пластичності зменшувались в 1,1–3,0 рази. Причому, чим менше міра легування

сталей, тим більший вплив має іонне азотування на ці характеристики. Після іонного азотування у водневому середовищі σ_b нижче відповідно на 17,7 % та 12,5 % порівняно з його значенням після іонного азотування в безводневому середовищі і навіть нижча порівняно з неазотованою сталлю. Ще більший вплив при іонному азотуванні має водневе середовище на зниження пластичності сталей. Так, для сталей Ст. 3, 40Х та 65Г, азотованих у водневому середовищі, відносне видовження δ зменшилося, відповідно, на 40 %, 45 % та 31 %, а відносне звуження ψ на 28 %, 68 % і 27,5 %, порівняно з їх значеннями при азотуванні в безводневому середовищі (табл. 4).

Шкідливий вплив водню на пластичні властивості сталей наочно видно з табл. 4 по роботі деформації, що є площею діаграми розтягування в системі координат δ , σ . Розрахунки показали, що робота деформації сталей Ст. 3, 40Х, 65Г і 12Х18Н10Т, азотованих у водневому середовищі, менше відповідно в 2,1; 1,9; 1,8 і 1,05 рази порівняно з її значеннями при азотуванні в безводневому середовищі.

Таблиця 4

Фізико-механічні характеристики зразків з різних сталей
при випробуваннях на розтяг після іонного азотування у водневих
і безводневих середовищах за режимом: $T = 580$ °С, $P = 240$ Па, $\tau = 4$ год

№ з/п	Марка сталі	Середовище іонного азотування	Межа міцності σ_b , МПа	Межа текучості σ_T , МПа	Відносне видовження δ , %	Відносне звуження ψ , %	Робота деформації A , МПа
1	Ст. 3	Неазотована	500	247	30,0	60,0	105,0
		Безводневе	557	295	10,0	25,0	51,0
		Водневе	474	338	6,0	18,0	25,0
2	40Х	Неазотована	560	380	10,0	30,0	41,1
		Безводневе	623	551	5,65	21,4	28,9
		Водневе	605	566	3,12	6,87	15,2
3	65Г	Неазотована	700	320	9,0	25,0	59,8
		Безводневе	744	587	3,83	14,9	29,4
		Водневе	661	544	2,67	10,8	16,5
4	12Х18Н10Т	Неазотована	520	280	40,5	55,2	182,3
		Безводневе	551	321	37,5	49,4	170,2
		Водневе	546	318	36,1	45,2	156,7

Іонне азотування в безводневих середовищах є ефективним способом підвищення багаточислової втоми сталей при згині. Дослідження гладких циліндричних зразків, які проводилися на машині ІМА-5 при чистому згині в середовищі 3-процентного розчину NaCl і на повітрі, показали, що межа

втривалості зразків, азотованих в безводному середовищі, при випробуваннях на повітрі підвищилася в 1,9 рази (з 190 до 370 МПа), а при випробуваннях у 3-процентному розчині NaCl – в 3,6 рази (з 30 до 110 МПа) порівняно з її значеннями для неазотованих зразків при випробуваннях в даних середовищах. Межа втривалості зразків, азотованих у водневому середовищі, при випробуваннях в 3-процентному розчині NaCl на 25 % нижча порівняно із зразками, азотованими за аналогічним режимом в безводному середовищі.

Як показали випробування (рис. 4) межа втривалості азотованих зразків із сталі 45X при випробуваннях на повітрі підвищилася на 37 % і на 31 % при випробуваннях в кислому середовищі порівняно з неазотованими зразками. Однією з основних причин такого підвищення межі втривалості окрім зміцнювальної дії покриття є значні залишкові напруження стиску в азотованому шарі, які разом з покриттям перешкоджають руху дислокацій до поверхні і тим самим уповільнюють зростання мікротріщин. Зразки, що азотувалися в водневому середовищі за аналогічним режимом, показали меншу втривалість на повітрі на 28 %, а в кислому середовищі на 21 % порівняно з азотованими зразками в безводному середовищі. Причиною такого зменшення є шкідливий вплив водню на сталь під дією зовнішнього навантаження після азотування.

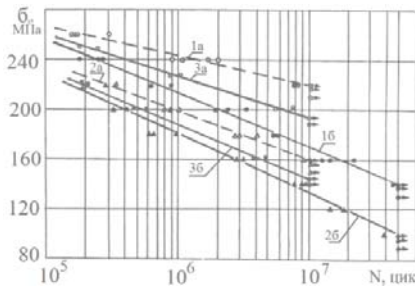


Рис. 4. Криві втоми плоских зразків с надрізом із сталі 45X:

- 1 – азотованих у безводному середовищі (75 об. % N₂ + 25 об. % Ar) за режимом: $T = 570$ °C, $P = 265$ Па, $\tau = 240$ хв; 2 – покращених;
- 3 – азотованих у водневому середовищі (75 об. % N₂ + 25 об. % H₂) за аналогічним режимом; а – на повітрі; б – в кислому середовищі (рН6,5)

Великий вплив на багатоциклову втому мають технологічні параметри іонного азотування. Вони можуть бути оптимізовані за критерієм максимальної довговічності. Так при випробуванні сталі 20 на багатоциклову втому при чистому згині $\sigma_{ze} = 220$ МПа в середовищі 3-процентного розчину NaCl, оптимальний режим азотування ($T = 550$ °C, $P = 240$ Па; $\tau = 130$ хв, $Ag = 40$ об.%) забезпечив максимальну довговічність $1,6 \cdot 10^6$ циклів.

Дослідженнями на малоциклову втому встановлено, що, застосування азотування сталей при відносних деформації $\epsilon > 0,3$ % в безводних

середовищах і $\varepsilon > 0,2$ % в водневих середовищах є недоцільним, оскільки їх довговічність нижча порівняно з неазотованими. Результати випробувань на малоциклову втому при згині зразків із сталі 45X показують, що при азотуванні в водневому середовищі їх довговічність значно нижча порівняно з азотуванням в безводневому середовищі насичення, а саме: в лужному середовищі на 10–13 %, на повітрі і нейтральному середовищах – на 15–20 % і в кислому середовищі на 25 %.

Дослідження сталі 45X на фретинг-втому, що проводилися на базі типової машини УКІ-10М, показали високу ефективність іонного азотування в безводневих середовищах для підвищення її довговічності. При випробуваннях на повітрі за оптимального режиму азотування ($T = 540$ °С; $P = 320$ Па; $\tau = 150$ хв; середовище 62 об. % N_2 +38 об. % Ar) довговічність складала $46,8 \cdot 10^6$ циклів (рис. 5), що перевищує в 10 разів довговічність неазотованих зразків.

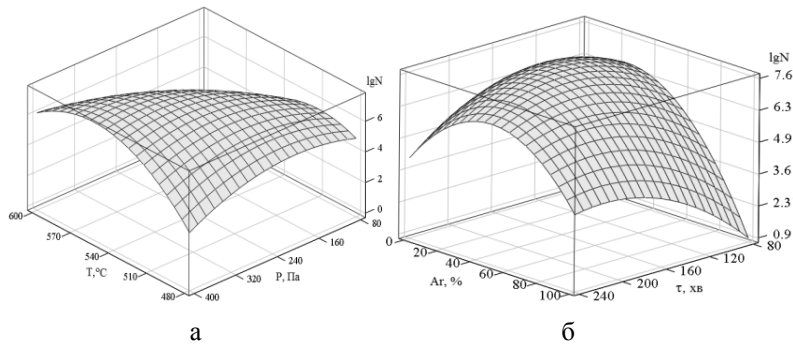


Рис. 5. Залежність фретинг-втомної витривалості сталі 40X від технологічних параметрів іонного азотування: а – $lgN = f(T, P)$ при $\tau = 150$ хв, $Ar = 38$ об. %; б – $lgN = f(\tau, Ar)$ при $T = 540$ °С, $P = 320$ Па

Порівняльні випробування зразків після іонного азотування у водневому середовищі (62 об. % N_2 +38 об. % H_2), при зазначеному вище оптимальному режимі азотування, в ідентичних умовах випробувань мали довговічність на 62 % нижчу порівняно із зразками, що азотувалися у безводневому середовищі. Причинами такого зменшення довговічності зразків є водневе окрихчення металу та утворенні великої кількості твердої і крихкої ε -фази в поверхневому шарі.

У **четвертому розділі** розглянуто способи та методики визначення залишкових напружень в азотованих шарах після іонного азотування в безводневих середовищах, їх вплив на напружено-деформований стан та оптимізацію при різних видах навантаження композиції «покриття – основа».

На основі аналізу існуючих способів визначення залишкових напружень в покриттях запропоновано більш простий експериментально-розрахунковий спосіб визначення залишкових напружень в дифузійних покриттях методом

прогину консольно закріплених зразків ($b \times h \times L$) з покриттям і без покриття з визначенням різниці прогинів $Y = Y_2 - Y_1$ та згинальної сили P_1 , що може викликати прогин Y , розрахунку середнього значення залишкових напружень σ від дії сили P_1 за відомою формулою опору матеріалів:

$$\sigma = \frac{6P_1L}{bh^2}. \quad (3)$$

Для визначення розподілу залишкових напружень в азотованих шарах по товщині покриття запропонована формула (4):

$$\sigma_z = \sigma \cdot e^{-\frac{k(z-0,45h_n)}{(h_n-z)^{0,94}}}, \quad (4)$$

де z – віддаль від поверхні до точки знаходження залишкових напружень в покритті; h_n – товщина покриття; k – коефіцієнт, що враховує вплив температури T °К нанесення дифузійного покриття. При іонному азотуванні $k = 900/T$ °К, що з'ясовано з експерименту.

Запропонований спосіб визначення залишкових напружень в азотованих шарах дає результати, що близькі до результатів їх визначення відомими способами. Зокрема, порівняно із способом М.М. Давиденкова визначені за запропонованим способом залишкові напруження мають відхилення, що не перевищують 4 % на товщині до 75 мкм.

Досліджено вплив технологічних параметрів процесу іонного азотування у безводневих середовищах на величину і розподіл залишкових напружень на поверхні азотованого шару на прикладі сталей 40Х та 20 з використанням чотирифакторного планування експериментів), на основі якого одержані рівняння залежності залишкових напружень від технологічних параметрів процесу азотування. Для сталі 40Х таке рівняння має вигляд:

$$\sigma_n(\text{МПа}) = 620 + 85x_1 + 62,5x_2 + 12,2x_3 - 16,8x_4 - 52,9x_1^2 - 33,2x_2^2 - 25,7x_3^2 - 91,6x_4^2 - 58,9x_1x_2 + 21,4x_1x_3 - 29,6x_1x_4 - 30x_2x_3 - 32,1x_2x_4 - 95,8x_3x_4, \quad (5)$$

$$\text{де } x_1 = \frac{(T-540)}{60}; \quad x_2 = \frac{(P-240)}{160}; \quad x_3 = \frac{(\tau-130)}{110}; \quad x_4 = \frac{(Ar-38)}{38}.$$

Аналогічне рівняння одержано і для сталі 20:

$$\sigma_n(\text{МПа}) = 523 + 65,4x_1 - 58,5x_2 - 24,2x_3 - 6x_4 - 32,3x_1^2 - 61x_2^2 - 37,7x_3^2 - 63,8x_4^2 - 40,8x_1x_2 - 8,8x_1x_3 - 20x_1x_4 - 24,5x_2x_3 + 53,8x_2x_4 + 100x_3x_4. \quad (5a)$$

На рис. 6 наведені графіки залежності σ_n від технологічних параметрів процесу іонного азотування сталі 40Х, що побудовані на основі рівняння (5), з яких видно, що ці залежності мають екстремальний характер і існують певні значення кожного з технологічних параметрів, при яких залишкові напруження досягають екстремального значення. При цьому існує оптимальний

технологічний режим азотування, що забезпечує максимальне значення залишкових напружень. Для сталі 40X оптимальний технологічний режим ($T = 570$ °C; $P = 240$ Па; $\tau = 240$ хв; середовище 81 об. % $N_2 + 19$ об. % Ar) забезпечує σ_n 718 МПа. Для сталі 20 таким режимом є: $T = 590$ °C; $P = 80$ Па; $\tau = 120$ хв; 81 об. % $N_2 + 19$ об. % Ar, що забезпечує $\sigma_n = 661$ МПа.

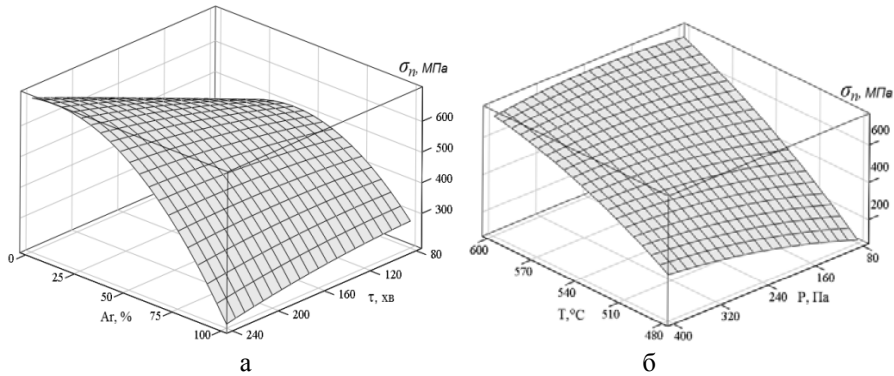


Рис. 6. Залежність залишкових напружень на поверхні сталі 40X від технологічних параметрів іонного азотування:

$a - \sigma_n = f(T, P)$ при $\tau = 240$ хв, $Ar = 19$ об. %; $b - \sigma_n = f(\tau, Ar)$ при $T = 570$ °C, $P = 240$ Па

Виявлена прямопропорційна кореляційна залежність між мікротвердістю та залишковими напруженнями в азотованому шарі (рис. 7а), яку можна описати формулою (6):

$$H_n = H_o + K_p \cdot \sigma_n, \quad (6)$$

де H_n та H_o – твердість поверхні азотованого шару і твердість основи сталі; K_p – коефіцієнт пропорційності, який знаходиться з експерименту для кожної марки сталі після азотування. Коефіцієнт $K_p = \text{ctg } \alpha = (H_n - H_o) / \sigma_n$ і для сталі ШХ15 він дорівнює 10,2.

Розроблено експериментально-розрахунковий спосіб визначення залишкових напружень по товщині в азотованих шарах за показником мікротвердості. Залишкові напруження в будь-якій точці по товщині азотованого шару визначаються за формулою (7):

$$\sigma_i = K_p (H_n - H_o)^{\frac{-h_i}{k(h_n - h_i)}}, \quad (7)$$

$$k = H_n / H_{\text{max}}, \quad (8)$$

де H_{max} – твердість поверхні азотованого шару при оптимальному режимі азотування; k – інтегральний коефіцієнт, що враховує вплив технологічних параметрів азотування на твердість; h_n – товщина азотованого шару; h_i – віддаль від поверхні до заданої точки визначення залишкових напружень.

На рис. 7б наведені графіки впливу режимів азотування на розподіл залишкових напружень по товщині азотованого шару, що отримані за запропонованим способом.

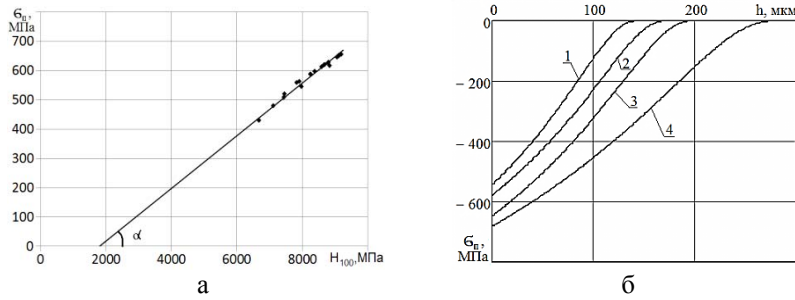


Рис. 7. а – залежність залишкових напружень на поверхні азотованого шару σ_n від твердості H_{100} азотованої поверхні сталі ШХ15;

б – розподіл залишкових напружень в азотованому шарі сталі ШХ15 після іонного азотування за різними режимами, що розраховували за даною методикою

Для впровадження даного способу рекомендується така методика:

1. Тонкі сталеві пластинки азотують в тліючому розряді за різними режимами з використанням чотирифакторного планування експериментів з метою одержання наступних характеристик азотованого шару: твердості поверхні і товщини азотованого шару при різних режимах азотування та визначення максимальної твердості при оптимальному режимі;

2. Визначають інтегральний коефіцієнт k за формулою (8);

3. Визначають залишкові напруження на поверхні азотованого шару за прогином азотованої з одного боку пластинки або за методом М.М. Давиденкова;

4. Визначають коефіцієнт $K_p = \operatorname{tg} \alpha$ з графіка $\sigma_n = f(H_n)$;

5. Вираховують залишкові напруження σ_i в заданій точці на віддалі h_i від поверхні азотованого шару за формулою (7).

При циклічному контактному навантаженні в процесі кочення залишкові напруження впливають на процес пристосування матеріалу на ділянці контакту, що сприяє підвищенню його довговічності. Відповідно до теореми Мелана, залишкові напруження можна вибрати такими, щоб в будь-якій точці в глибині матеріалу при контактному навантаженні не було пластичної деформації. Тоді, використовуючи рівняння головних напружень з врахуванням залишкових напружень в покритті, що запропоновані К. Джонсоном, теорему Мелана і критерій Треска ($p_0 \leq 4k$) отримано умову для розрахунку величини залишкових напружень в покриттях, що забезпечать пристосування пари кочення.

$$\frac{1}{4} \left\{ \sigma_x + (\sigma_x)_z - \sigma_z \right\}^2 + \tau_{zx}^2 \leq k^2, \quad (9)$$

де k – константа текучості при чистому зсуві.

За критерієм Мізеса $p_0 \leq 3,1k$ при плоскому напруженому стані і $p_0 \leq 2,8k$ при об'ємному напруженому стані; p_0 – максимальний тиск на ділянці контакту.

На прикладі пластини з двостороннім дифузійним покриттям, що навантажується згинальним моментом, досліджено вплив залишкових напружень на напружено-деформований стан матеріалу. Визначено величину оптимальних залишкових напружень стиску σ'_o (10) в покритті за критерієм рівномірності розтягнутих і стиснутих волокон при згині:

$$\sigma'_o = \frac{\sigma_{e.p.n}(1-\chi)}{2\chi}. \quad (10)$$

де $\chi = \frac{\sigma_{e.p.n}}{\sigma_{e.c.n}}$ – критерій Писаренка–Лебедева матеріалу покриття.

Дослідження показали, що такі залишкові напруження стиску забезпечують максимальну втомну витривалість при згині.

У **п'ятому розділі** проведені теоретичні дослідження термоактивування азотованих шарів та властивостей поверхневих шарів після технологій нітрогартування та оксинітрогартування.

Розглянуто процес дифузії, що описується рівнянням виду:

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D[t(x, \tau)] \frac{\partial C(x, \tau)}{\partial x} \right\}; \quad (11)$$

$$C(x, 0) = f(x); \quad C(L, \tau) = 0; \quad L \rightarrow \infty; \quad (12)$$

$$-D(0, \tau) \frac{\partial C(0, \tau)}{\partial x} = \beta [C_0^* - C(0, \tau)], \quad (13)$$

де $D[t(x, \tau)]$ – коефіцієнт дифузії; β – коефіцієнт масоперенесення; C_0 – концентрація на межі $x = 0$.

Початковий розподіл концентрації азоту $f(x)$ в азотованому шарі сталі ШХ15 показано в табл. 5.

Таблиця 5

Початковий розподіл концентрації азоту в азотованому шарі сталі ШХ15

Віддаль від поверхні азотованого шару, в мкм	0	10	15	20	30	35	60
Вміст азоту, %	10	5,18	0,7	0,37	0,23	0,071	0,003

Одержані залежності розподілу концентрації азоту по глибині азотованого шару сталі ШХ15 (рис. 8а) при різних температурах термоактивування за витримки у 400 секунд. При термоактивуванні відбувається суттєвий перерозподіл концентрації азоту в азотованому шарі в результаті дифузії (рис. 8а). При

цьому з підвищенням температури зменшується градієнт концентрації азоту по глибині, що зумовлює зменшення градієнта твердості.

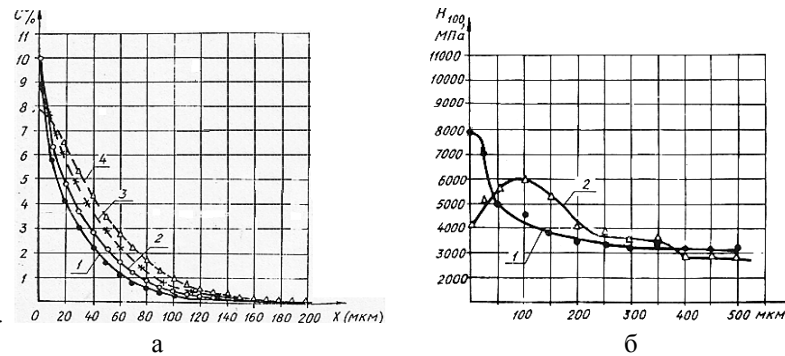


Рис. 8. а – розподіл концентрації азоту по глибині азотованого шару сталі ШХ15.

Термоактивування 400 с при різних температурах:

1 – 540 °С; 2 – 600 °С; 3 – 700 °С; 4 – 780 °С;

б – зміна мікротвердості по глибині азотованого шару сталі 40X після іонного азотування:

1 – без термоактивування; 2 – з наступним нагрівом в аргоні до температури 860 °С, витримкою 25 хв і повільним охолодженні у вакуумі

При термоактивуванні від температур гартування вищі нітриди розпадаються, переходять у нижчі, та виділяють азот. В результаті цього збільшується товщина азотованого шару і зменшується твердість поверхні та її градієнт по глибині. При великій витримці при температурі гартування розпад метастабільних нітридних фаз інтенсифікується і азот, що вивільнився, може дифундувати не лише в глиб металу, але і в навколишнє середовище. Запобіжником цього може стати бар'єрний шар (рис. 9б і 9а). Дослідженнями встановлено, що бар'єрним шаром для дифузії азоту є оксидний шар.

Гартування після термоактивування приводить до підвищення твердості основи, що є одним із важливих факторів збільшення несучої здатності та контактної витривалості композиції «покриття – основа». В зв'язку з цим запропоновані інтегральні технології іонного нітрогартування та оксинітрогартування, що включають комплекс операцій іонного азотування або іонного оксиазотування в безводневих середовищах, термоактивування дифузійного шару з певною витримкою при температурі гартування в розплаві солей, гартування в масилі та наступний низькотемпературний відпуск при температурі 160 °С протягом 90 хв.

Дослідження (рис. 9) показали, що при нітрогартуванні та оксинітрогартуванні змінюється не тільки твердість основи, але й властивості азотованого шару (структура, фазовий склад, товщина, твердість, градієнт твердості по глибині, залишкові напруження стиску), які можна змінювати за допомогою вибору режиму іонного азотування (рис. 9б) та часу

термоактивування (рис. 9а). Встановлено, що в умовах випробувань витримка 7 хв при нітрогартуванні та оксинітрогартуванні є оптимальною для отримання максимальної контактної витривалості сталей.

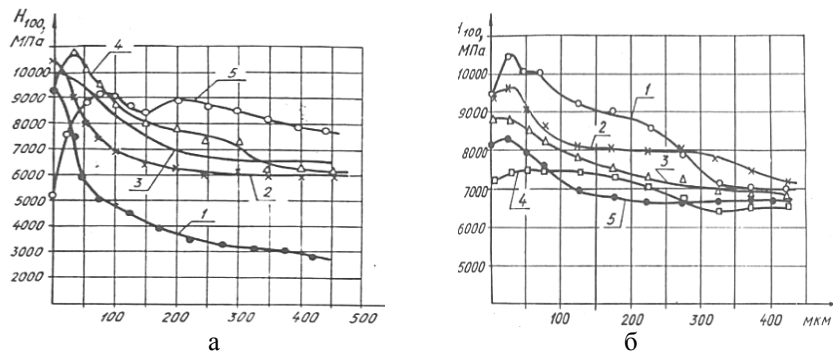


Рис. 9. а – зміни мікротвердості по глибині зразків із сталі ШХ15 після іонного азотування – 1 та після нітрогартування з різною витримкою при температурі гартування: 2 – 5 хв, 3 – 7 хв, 4 – 10 хв і 5 – 25 хв; б – зміни мікротвердості по глибині зразків із сталі ШХ15 після нітрогартування з нагрівом до 860 °С, витримкою 7 хв з попереднім іонним азотуванням за різними режимами

При оксинітрогартуванні (рис. 10б) наявність оксидного шару на поверхні азотованого шару стримує дифузію азоту в навколишнє середовище і сприяє збільшенню його дифузії в глиб металу та зменшенню мікротвердості на поверхні на відміну від нітрогартування (рис. 10а), при якому відбувається зменшення твердості поверхні за рахунок дифузії азоту і вуглецю в навколишнє середовище. Товщина цього дефектного шару складає 20–30 мкм при витримці в процесі термоактивування, тому його необхідно видаляти шліфуванням для підвищення контактної витривалості.

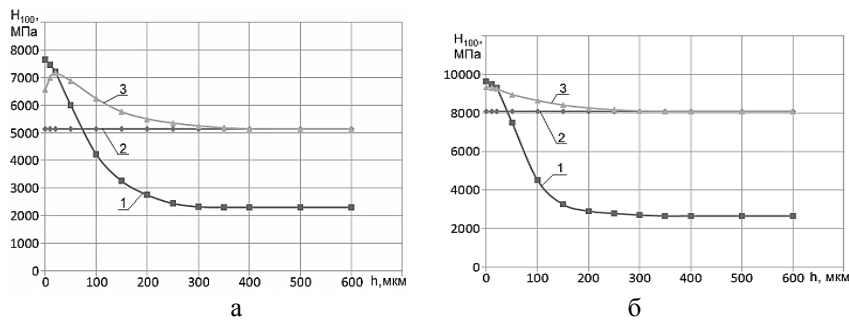


Рис. 10. Розподіл мікротвердості від поверхні по глибині:
а – сталі 40Х після: 1 – іонного азотування; 2 – гартування; 3 – нітрогартування;
б – сталі Х12М після: 1 – іонного азотування; 2 – гартування; 3 – оксинітрогартування

У шостому розділі наведена методика і результати експериментальних досліджень зносостійкості і контактної витривалості зразків різних сталей з різними покриттями при терті кочення з проковзуванням в різних середовищах. Експериментальні дослідження проводилися на розробленій універсальній установці (патент на корисну модель № 106181) зі змінними вузлами тертя для випробувань зразків на тертя кочення з точковим і лінійним контактами та на тертя ковзання.

Експериментальні випробування мали своєю метою дослідження кінетики зношування і контактної витривалості конструкційних сталей з різним вмістом вуглецю і легованості, з різними за властивостями покриттями і технологіями їх нанесення в різних середовищах (нейтральних агресивних, на повітрі). Зразки виготовляли із сталей 20, 40Х, ШХ15 і Х12М, на які наносили покриття: дифузійні, методом осадження в вакуумі і гальванічного осадження. Дослідження включали два етапи: 1) порівняльні випробування зразків з різними покриттями в різних середовищах при максимальному тиску на ділянці контакту 2140 МПа; 2) дослідження зразків із сталей ШХ15 і Х12М після нітрогартування з оптимізацією технологічних режимів нанесення покриттів. Проводили дослідження на контактну витривалість зразків з покриттями при точковому і лінійному контактах при однакових тисках на ділянці контакту. В розділі наведені фізико-механічні характеристики зразків, що випробувались на контактну витривалість і зносостійкість.

Нанесення покриттів проводили із застосуванням технологій іонного азотування в водневих і безводневих середовищах, інтегральних технологій нітрогартування та оксинітрогартування, вакуумного осадження нітриду титану, гальванічного осадження хрому. Для цього застосовувалося спеціальне обладнання. Проводилися порівняльні дослідження і дослідження кінетики зношування покриттів та їх контактної витривалості в різних середовищах (мастилі І-20, дистильованій воді, 3-процентному водному розчині NaCl, гідравлічній рідині ПГВ та при сухому терті). В процесі досліджень кінетики зношування проводились вимірювання мікротвердості та шорсткості на доріжці кочення, фрактографічні та рентгенструктурні дослідження. Крім того досліджувався вплив водню та величини навантаження на контактну витривалість сталей з покриттями і без покриттів.

Знос на доріжці кочення зразків з твердістю основи HRC > 45 вимірювався за допомогою профілографа-профілометра моделі 201. Знос зразків з твердістю основи HRC < 45 вимірювався за допомогою спеціально сконструйованого пристрою з точністю $\pm 0,5$ мкм. В процесі випробувань контактної витривалості мало місце проковзування тіл кочення. В зв'язку з цим сумарний знос має дві складові – деформаційну і знос від проковзування. З метою виявлення впливу на величину сумарного зносу деформаційної складової проводилися окремо випробування на тертя ковзання. Величину деформаційної складової зношування знаходили методом віднімання від

сумарного зносу величини зносу при терті ковзання. Обробку результатів експериментів було проведено з застосуванням методів математичної статистики.

Кінетика процесу зношування і зміни мікротвердості на доріжці кочення досліджувались на сталях 20, 40X і X12M з різними покриттями, без покриттів і з різною твердістю основи та при різних навантаженнях на кульку в середовищі масла I-20 та інших середовищах. Дослідження показали, що вже в перші цикли навантаження на ділянці контакту виникає інтенсивна пластична деформація поверхні матеріалу, що зменшується з часом, досягаючи мінімального значення. Величина деформації залежить від величини нормального навантаження і тим більша, чим менші твердість і товщина покриття та твердість основи. При цьому змінюється твердість і шорсткість поверхні, яка спочатку спадає, а потім зростає в результаті нагартування матеріалу (рис. 11а). В процесі циклічного навантаження шорсткість поверхні приходить до зрівноваженої залежно від структури матеріалу. В гартованих і нітрогартованих зразках деформації і нагартування значно менші, що приводить до меншого сумарного зносу. Великий вплив на кінетику зношування мають середовища випробувань. Агресивні та абразивні середовища значно збільшують знос (рис. 11б) та зменшують контактну витривалість. При цьому в усіх середовищах знос сталі після іонного азотування значно менший порівняно з неазотованою сталлю.

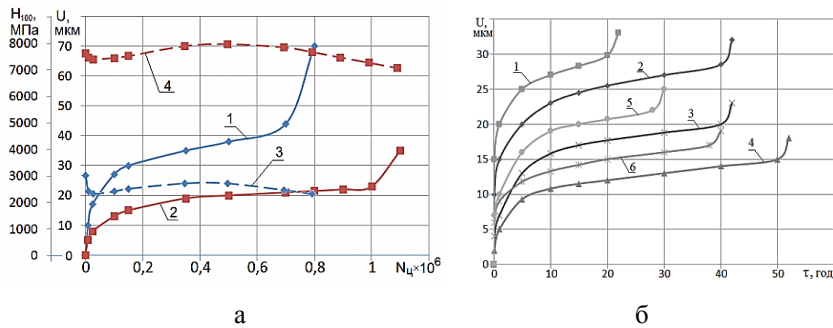


Рис. 11. а – кінетика зношування (1, 2) та зміни мікротвердості (3, 4) на доріжці кочення сталі 40X в мастилі I-20. 1, 3 – сталь без термообробки; 2, 4 – сталь без термообробки + іонне азотування; б – кінетика зношування сталі 40X: 1, 2 – у морській воді; 3, 4 – в мастилі I-20; 5, 6 – при сухому терті; 1, 3, 5 – сталь гартована. 2, 4, 6 – сталь гартована + іонне азотування

Процес зношування при багатоциклового навантаженні в процесі кочення поділяється на три стадії: 1 – припрацювання; 2 – накопичення пошкоджень; 3 – руйнування. Фізичні процеси, що відбуваються в кожній із стадій при терті кочення деталей з покриттями подібні до процесів при коченні без покриттів і відрізняються лише часом кожної із стадій. Він суттєво залежить від властивостей покриттів та середовища і може значно

відрізнятися для деталей без покриттів. Наприклад, в рідині ПГВ за рахунок дії її компонентів вдвічі прискорюється процес утворення пошкоджень у вигляді викривчень з погіршенням шорсткості поверхні порівняно з мастилом I-20.

Величина зношування при терті кочення з проковзуванням включає дві складові – деформаційну і знос від тертя ковзання. Величину деформаційної складової зношування знаходили методом віднімання від сумарного зносу величини зносу при терті ковзання.

Дослідженнями встановлено, що на деформаційну складову сумарного зносу найбільший вплив, крім властивостей покриття, має величина навантаження (рис. 12а) та твердість основи (рис. 12б), а на складову зносу від проковзування – фізико-механічні властивості, структура і фазовий склад азотованого покриття. Ці залежності мають нелінійний характер, при якому відбувається зменшення контактної витривалості при зростанні навантаження та їх зростання при збільшенні твердості основи.

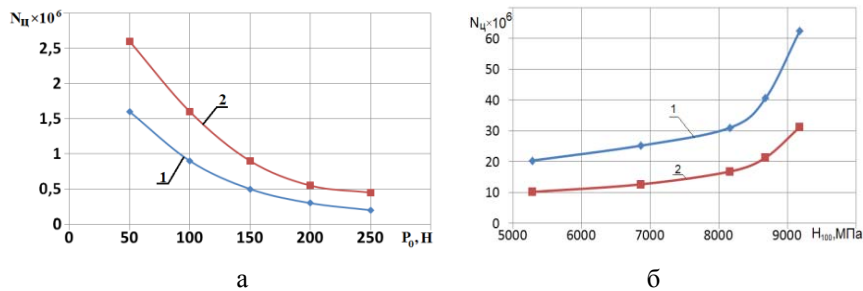


Рис. 12. а – залежність контактної витривалості сталі 20 до і після іонного азотування при терті кочення з проковзуванням при різних навантаженнях на кульку: $N = 50; 100; 160$ і 250 Н (максимальний тиск на ділянці контакту складає, відповідно $1485; 1872; 2188; 2355$ МПа); б – залежність контактної витривалості від твердості основи сталі X12M: 1 – після оксинітрогартування; 2 – після гартування

Дослідження процесу зношування сталей з покриттями після нітрогартування при терті кочення і ковзання (рис. 13) показали, що інтенсивність зносу залежить від технологічних режимів азотування і її можна мінімізувати за рахунок оптимізації властивостей поверхневого шару, яка досягається при оптимальних технологічних режимах нітрогартування.

В умовах проведення експериментів коефіцієнт проковзування кульок складав $5,4\%$, а для роликів $26,6\%$. Дослідженнями встановлено, що частка зносу від проковзування в сумарному зносі є переважаючою (до 95%) для гартованих і нітрогартованих сталей як при точковому, так і при лінійному контактах і зростає зі збільшенням коефіцієнта проковзування. Навпаки, для азотованих сталей без термічної обробки, що мають малу твердість основи, частка деформаційної складової є переважаючою в сумарному зносі (до 90%), і зростає зі збільшенням нормального навантаження і зменшенням твердості основи.

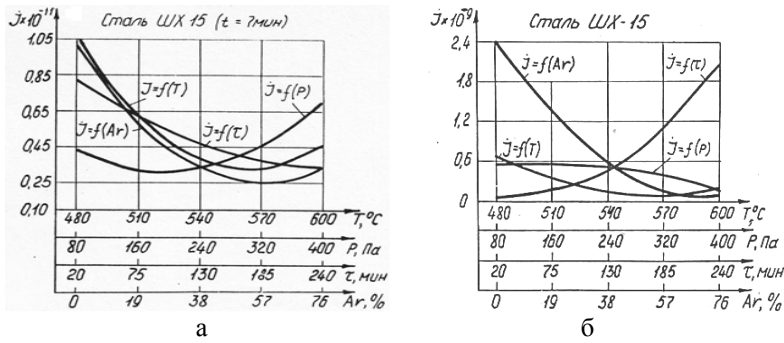


Рис. 13. Залежність інтенсивності зношування при терті кочення (а) і терті ковзання (б) в середовищі мастила І-20 сталі ШХ15 після нітрогартування (витримка в розплаві солей 7 хв) від технологічних параметрів іонного азотування ($p_0 = 1670$ МПа)

В табл. 6 наведені результати випробувань зразків на контактну витривалість при терті кочення з точковим і лінійним контактами в різних середовищах. Середовище має великий вплив на контактну витривалість.

Таблиця 6

Вплив середовища на контактну витривалість зразків з сталі 40Х при терті кочення з проковзуванням при точковому і лінійному контактах (максимальний тиск на ділянці контакту $P_0 = 2140$ МПа)

№ з/п	Вид термічної і хіміко-термічної обробки	Контактна витривалість у різних середовищах, $N \cdot 10^6$ циклів				
		Мастило І-20	Морська вода	Сухе тертя	Дистильована вода	Абразивне
Точковий контакт						
1	Гартування	23,7	11,3	16,5	19,5	11,3
2	Гартування + іонне азотування	26,8	22,3	20,5	25,9	13,2
3	Нітрогартування	44,55	28,25	28,9	39,1	18,1
Лінійний контакт						
4	Гартування	18,9	9,7	16,03	13,3	6,8
5	Гартування + іонне азотування	23,1	17,5	19,7	15,8	8,3
6	Нітрогартування	33,1	20,37	26,1	25,27	10,2

Результати випробувань показали, що найвищу контактну витривалість в усіх досліджуваних середовищах мали зразки після нітрогартування. Їх контактна витривалість при точковому контакті в мастилі І-20 на 88 %, в абразивному середовищі на 60 %, при сухому терті на 75 %, в дистильованій воді в 2 рази і морській воді в 2,5 рази більша порівняно з гартованими зразками. Подібні результати отримані при аналогічних умовах випробувань нітрогартованих

зразків і для лінійного контакту пар тертя. Результати наведені в табл. 6 доводять, що іонне азотування після гартування має значно менший вплив на підвищення контактної витривалості ніж нітрогартування. В процесі іонного азотування зменшується твердість основи в результаті високотемпературного відпуску гартованої сталі, що викликає зменшення контактної витривалості композиції «азотоване покриття – основа».

Дослідженнями встановлено, що найбільший ефект підвищення контактної витривалості від іонного азотування і нітрогартування має місце в морській воді, а саме: від іонного азотування після гартування в 1,8 рази при лінійному контакті і 1,97 рази при точковому контакті; а від застосування нітрогартування відповідно 2,1 та 2,5 рази порівняно з гартованою сталлю. Це пояснюється тим, що азотований шар має антикорозійні властивості, які сприяють підвищенню контактної витривалості в агресивних середовищах.

Наявність водню в середовищі насичення, вміст якого перевищує 10 об. % приводить до зниження контактної витривалості в зв'язку водневим окрихченням металу. Це наглядно видно на прикладі іонного азотування у водневих і безводневих середовищах за ідентичними режимами (табл. 7).

Таблиця 7

Вплив водню на контактну витривалість різних сталей при терті кочення з проковзуванням в мастилi I-20 зразків з точковим та лінійним контактами після іонного азотування у водневих (62 об. % N₂+ 38 об. % H₂) і безводневих (62 об. % N₂+38 об. % Ar) середовищах при тиску P₀ = 2140 МПа

№ з/п	Вид термічної і хіміко-термічної обробки сталі	Контактна витривалість різних сталей, N·10 ⁶ циклів			
		20	40X	ШХ15	X12M
Точковий контакт					
1	Без термічної обробки	0,5	0,6	0,7	0,9
2	Іонне азотування у водневому середовищі	0,65	0,80	0,91	1,25
3	Іонне азотування у безводневому середовищі	0,85	0,96	1,08	1,30
Лінійний контакт					
4	Без термічної обробки	0,4	0,5	0,55	0,75
5	Іонне азотування у водневому середовищі	0,55	0,70	0,8	1,0
6	Іонне азотування у безводневому середовищі	0,76	0,82	0,9	1,15

Контактна витривалість сталей, що азотувалися безводневих середовищах, підвищилася в 1,44–1,7 рази порівняно з неазотованими. Ці ж сталі після азотування в водневому середовищі мали контактну витривалість на 15–54 % меншу порівняно з азотуванням в безводневому середовищі, причому шкідливий вплив водню збільшується при зменшенні легованості сталі. Наприклад, зниження

контактної витривалості при іонному азотуванні у водневому середовищі порівняно з іонним азотуванням в безводневому середовищі при точковому контакті для сталі 20 складає 45 %, для сталі 40X – 20 %, для сталі ШХ15 – 18 %, а для сталі Х12М – 4 %.

Зменшення контактної витривалості при лінійному контакті порівняно з точковим контактом при ідентичних умовах випробувань пояснюється різними умовами роботи матеріалу при плоскому і об'ємному напружено-деформованому станах та більшим коефіцієнтом проковзування.

У табл. 8 наведені результати порівняльних досліджень контактної витривалості та зносостійкості в мастилі І-20 при точковому контакті різних сталей з різною термічною обробкою та різними покриттями.

Таблиця 8

Фізико-механічні і трибологічні характеристики зразків з різних сталей з різними покриттями при випробуваннях на тертя кочення з точковим контактом в мастилі І-20, максимальний тиск на ділянці контакту 2140 МПа

№ з/п	Марка сталі	Вид термообробки та технології нанесення покриття	Мікротвердість Н ₁₀₀ , МПа			Товщина покриття, мкм	Інтенси́вність зношування, /10 ⁻¹¹	Довгові́чність, /10 ⁶ циклів
			Поверхні	Основи	Доріжки кочення після випробувань			
1	20	без термообробки	2890	2250	3120	–	660	0,50
2	20	іонне азотування	6410	2250	3240	280	530	0,85
3	20	іонне оксиазотування	6140	2250	3250	284	475	0,93
4	40X	без термообробки	3200	2560	3320	–	540	0,65
5	40X	без термообр. + іонне азот.	7620	2560	7240	330	457	1,00
6	40X	без термообр. + оксиазотув.	7190	2560	7210	335	405	1,07
7	X12M	без термообробки	3300	2950	2910	–	540	0,90
8	X12M	без термообр. + іонне азот.	8820	2650	8210	310	280	1,30
9	X12M	без термообр. + оксиазотув.	7940	2650	7530	315	190	1,40
10	40X	без термообробки + TiN, КІБ	14000	2680	3350	5	164	0,75
11	40X	гартування	5600	5500	5420	–	9,1	23,1
12	40X	гартування+іонне азотування	9180	4170	7160	300	8,4	25,5
13	40X	гартування+TiN, метод КІБ	14000	4120	5200	5	14,2	20,8
14	40X	гартування+гальванічний Cr	12000	5610	7140	5	7,7	27,3
15	40X	гартування+гальванічний Cr	12000	5610	7300	10	7,3	29,1
16	40X	оксинітрогартування, режим 1	8700	5700	7630	330	3,8	41,8
17	40X	оксинітрогартування, режим 2	7700	5700	7420	350	3,1	47,5
18	40X	оксинітрогартування, режим 3	7300	5700	7380	410	3,4	36,2
19	40X	нітрогартування, режим 1	8300	7200	7410	320	4,2	38,7
20	X12M	гартування	7560	7520	7470	–	7,6	27,1
21	X12M	гартування + іонне азотув.	8670	5670	7530	320	6,1	33,2
22	X12M	нітрогартування, режим 1	8270	7140	9530	340	3,3	43,4
23	X12M	оксинітрогартування, режим 1	8340	7140	9680	360	2,8	62,5

Для всіх досліджуваних марок сталей без термічної обробки контактна витривалість та зносостійкість після іонного азотування значно (1,44–1,6 рази), а після іонного оксиазотування (1,55–1,78 рази) перевищує її значення порівняно з неазотованими зразками. При цьому контактна витривалість зростає зі збільшенням твердості основи. Покриття з TiN та гальванічного Cr, що наносилися на зразки сталей без термообробки, не дивлячись на високу твердість, зруйнувалися після $0,75 \cdot 10^6$ циклів навантаження відшаруванням від основи.

Твердість гартованих зразків середньовуглецевої сталі 40X більше, як в 2 рази, а високовуглецевої легованої сталі X12M більше, як в 3 рази перевищує їх твердість без термічної обробки. В зв'язку з цим їх контактна витривалість на порядок перевищує цей показник азотованих та неазотованих сталей без термообробки. Дослідження показали, що іонне азотування за оптимальними режимами після гартування сталей приводить до підвищення їх контактної витривалості до 35 % порівняно з гартованими сталями. Слід відзначити, що при іонному азотуванні відбувається високотемпературний відпуск гартованої сталі і азотований шар опирається на основу значно меншої твердості, ніж твердість гартованої сталі. Величина твердості основи після відпуску залежить від режиму азотування і може знижуватися на 20–30 % від твердості гартованої сталі.

Це приводить до зниження ефекту від азотування. Аналогічна картина отримана при нанесенні покриття TiN на основу із сталі 40X методом КІБ, при якому мікротвердість основи знизилася від 5600 МПа до 4120 МПа і контактна витривалість знизилася на 11 % порівняно з гартованою сталлю 40X. Водночас, покриття із хрому, що наносилося гальванічним методом на ту ж гартовану сталь, але без відпуску основи, показало підвищення контактної витривалості на 13 % при товщині покриття 5 мкм і на 19 % – при товщині покриття 10 мкм порівняно із гартованою сталлю 40X (табл. 8, пп. 10, 13–15).

Альтернативою технології іонного азотування після гартування є іонне нітрогартування і оксинітрогартування. Після нітрогартування сталей 40X і X12M їх контактна витривалість складала відповідно $38,7 \cdot 10^6$ і $43,25 \cdot 10^6$ циклів навантажень, що в 1,5 рази більше порівняно з гартованими зразками, а інтенсивність зношування в 2,5 рази менша. Застосування технології оксинітрогартування за оптимальними режимами для сталей X12M та 40X (табл. 8) дозволило підвищити контактну витривалість зразків, відповідно, в 1,9 і 2,2 рази порівняно з гартованими сталями.

Для практики важливе значення має прогнозування довговічності конструкційних елементів. Запропоновано комплексний критерій K оцінки контактної витривалості композиції «азотоване покриття – основа» при терті кочення на основі її фізико-механічних характеристик з врахування основних факторів, що впливають на контактну витривалість при терті кочення. Визначені його оптимальні значення для різних типів сталей і технологій нанесення азотованих покриттів, що забезпечують максимальне підвищення

контактної витривалості конструкційних елементів з азотованими покриттями. Використання критерію при аналізі властивостей деталей з покриттями сприятиме зменшення кількості експериментальних досліджень при випробуваннях.

Критерій включає наступні основні фактори, що впливають на контактну витривалість: товщину покриття, характеристики твердості покриття і основи та їх співвідношення, залишкові напруження стиску в покритті, межі міцності та текучості матеріалу, градієнт твердості по глибині покриття:

$$K = \frac{h_{II}}{h_{max}} \cdot \frac{H_{II}}{H_O} \cdot \frac{H_{OT}}{H_O} \cdot \frac{\sigma_T + \sigma_3}{\sigma_B} \cdot (1/\text{grad } H_{II}), \quad (14)$$

де h_{max} – максимальна товщина азотованого шару, одержаного при азотуванні за оптимальним режимом;

h_{II} – товщина азотованого шару зразка, що досліджують, мкм;

H_{II} – мікротвердість поверхні шару, що досліджують;

H_O – мікротвердість основи, на яку нанесене покриття;

H_{OT} – мікротвердість основи після термообробки;

σ_T – межа текучості матеріалу основи;

σ_B – межа міцності матеріалу основи;

σ_3 – залишкові напруження стиску на поверхні азотованого шару;

$\text{grad}H_{II}$ – значення градієнта твердості на поверхні покриття, що визначається за формулою (15):

$$\text{grad}H_{II} = \frac{HV_{II} - HV_O}{h_{II}} \quad (15)$$

де HV_{II}, HV_O – твердості покриття і основи, виражені в одиницях Віккерса, а h_{II} виражається в мкм.

Розрахунки комплексного критерію K для різних сталей, які зміцнювалися за різними технологіями при оптимальних значеннях властивостей композиції «азотоване покриття – основа» та їх порівняння з результатами випробувань зразків на контактну витривалість при терті кочення, показали, що більшому значенню K відповідає більша контактна витривалість зразків з покриттями. Встановлено, що величина критерію K залежить від марки сталі та технології її зміцнення і існує діапазон його оптимальних значень для кожної із зазначених вище технологій і типів сталей, при яких досягається найбільша контактна витривалість композиції «покриття – основа», а саме:

– при технології іонного азотування у безводневих середовищах сталей без термообробки $K = 3,2 \dots 3,6$ для пластичних маловуглецевих сталей, $K = 4,2 \dots 5,0$ для середньо- та високовуглецевих і легованих сталей;

– при технології іонного азотування в безводневих середовищах сталей після термообробки $K = 8..9$ для середньовуглецевих сталей, $K = 12..13$ для легованих середньовуглецевих сталей;

– при технологіях іонного нітрогартування та оксинітрогартування $K = 12..13$ для середньовуглецевих низьколегованих сталей, $K = 26..29$ для високолегованих середньо- і високолегованих сталей. Більші значення відносяться до технології оксинітрогартування.

Досліджено вплив основних факторів, що впливають на контактну витривалість, та величину комплексного критерію. Виявлено кореляційний зв'язок між комплексним критерієм K і контактною витривалістю сталей при терті кочення. Дослідження показали, що найвищі значення комплексного критерію K та контактної витривалості при терті кочення мають сталі з покриттями після технологій нітрогартування та оксинітрогартування.

У **сьомому розділі** наведені результати промислових випробувань і впровадження результатів досліджень.

На відокремленому підприємстві «Волочиський машинобудівний завод» ПАТ «Мотор Січ» впроваджена технологія оксинітрогартування для зміцнення зубчастих коліс мотоблоків. Застосування технології оксинітрогартування підвищує контактну витривалість зубчастих коліс мотоблока «Мотор Січ МБ-6» в мастилі І-20 в 2,18 рази.

На ТОВ НВФ «Адвісмаш» впроваджена технологія іонного азотування у безводневих середовищах для зміцнення великогабаритних конічних зубчастих коліс (діаметром 600 мм і модулем 11 мм) бурякорізальної машини Т2М–СЦ2Б–16. Зубчасті колеса виготовлялися із сталі 45 без термообробки (твердість HRC 24).

Після іонного азотування за оптимальним режимом одержано азотований шар товщиною 360 мкм і мікротвердістю поверхні 7610 МПа. Після іонного азотування ніяких деформацій зубчастих коліс не виявлено. Ресурсні випробування зубчастих коліс в складі бурякорізальних машин проводилися на ВАТ «Наркевицький цукровий завод», ВАТ «Старокостянтинівський цукровий завод» та ПАТ «Красилівський цукровий завод» у виробничих умовах і показали підвищення їх довговічності та контактної витривалості після іонного азотування в 1,65–1,9 рази (в середньому в 1,8 рази) порівняно з неазотованими зубчастими колесами.

На ПАТ «Завод «Темп» у 2011–2012 рр. впроваджена технологія іонного азотування в безводневих середовищах великогабаритних зубчастих коліс діаметром 780 мм і товщиною 58 мм із сталі 40Х та вал-шестерні із сталі ХВГ діаметром 156 мм і довжиною 255 мм з модулем 7 мм, які застосовувалися при виготовленні агрегатів для зварювання труб магістральних трубопроводів. Результати промислових випробувань показали, що довговічність даної зубчастої пари після зміцнення іонним азотуванням збільшилась в 1,4 рази і

склала 35 місяців роботи ($0,77 \cdot 10^6$ циклів навантажень для колеса і $3,85 \cdot 10^6$ циклів навантажень для вал-шестерні).

Промислові випробовування накатних роликів, що зміцнювалися за технологією нітрогартування, проводились спільно з ДП «Красилівський агрегатний завод» та науково-виробничим підприємством «Віднова». Дослідження показали, що рекомендована технологія нітрогартування сталі Х12М підвищила довговічність накатних роликів в 1,9...2,2 рази залежно від умов експлуатації порівняно з довговічністю накатних роликів із сталі У8 в тих же умовах експлуатації. Довговічність роликів із сталі Х12, зміцнених за технологією нітрогартування, підвищилася в 2,1 рази порівняно з довговічністю накатних роликів із сталі ХВГ.

На підприємстві ТОВ Р.І.Н.О. проведені випробування і впроваджена в виробництво технологія нітрогартування упорних кулькових підшипників кочення № 8207 ГОСТ 7672–89 (табл. 8.5), які застосовуються в черв'ячних редукторах серії ММ 01.01.00.00.00 при виробництві мотоблоків. Результати стендових випробувань показали, що довговічність кілець підшипників, виготовлених з сталі ШХ15 із застосуванням технології нітрогартування, складала $48,8 \cdot 10^6$ циклів навантажень, що у 1,9 рази більше порівняно з довговічністю кілець із сталі ШХ15 після гартування, що виготовлялися за стандартною технологією.

ВИСНОВКИ

При виконанні дисертаційної роботи вирішувалась актуальна наукова проблема підвищення контактної витривалості і зносостійкості конструкційних елементів з покриттями при терті кочення, яка має велике значення для народного господарства. На основі проведених досліджень зроблені наступні висновки наукових та практичних результатів роботи:

1. Запропоновано новий метод підвищення контактної витривалості та зносостійкості конструкційних елементів з покриттями при терті кочення. Метод включає: іонне азотування або іонне оксиазотування в безводневих середовищах за технологічними режимами, що забезпечують максимальну твердість та товщину азотованого шару; термоактивування азотованого шару в розплаві солей з певною витримкою в часі при температурі гартування для оптимізації властивостей покриття; наступне гартування та низькотемпературний відпуск для забезпечення високої твердості основи.

2. Отримані нові залежності властивостей азотованих шарів (товщини, твердості, градієнта твердості по товщині, хімічного і фазового складів) після іонного азотування в безводневих середовищах конструкційних сталей від технологічних параметрів процесу азотування та їх оптимальні значення на основі оптимізації технологічних режимів.

3. Теоретично встановлено і експериментально підтверджено, що термоактивування азотованих шарів при температурах гартування сталей призводить до часткового розпаду вищих нітридів і дифузії азоту в середину азотованого шару. При цьому збільшується товщина азотованого шару та зменшується градієнт твердості по товщині покриття. Нанесення на азотовану поверхню оксидного шару при термоактивуванні сприяє зменшенню дифузії азоту в навколишнє середовище та покращує його дифузію в глибину металу. Гартування після термоактивування збільшує твердість основи, що є одним із важливих факторів підвищення контактної витривалості композиції «покриття – основа».

4. Встановлено, що іонне азотування в безводневих середовищах має такі переваги над азотуванням в водневих середовищах: виключається воднева крихкість металу; підвищується пластичність азотованого шару; в 1,3–1,5 рази зменшується енергія активації процесу, що приводить до зменшення витрат електроенергії до 40 %; процес є екологічно чистим. Іонне азотування в безводневих середовищах підвищує втомну витривалість сталі 45 при згині на повітрі на 37 % і на 31 % в кислому середовищі, а фреттинг-втому при згині до 10 разів порівняно з неазотованою сталлю.

Контактна витривалість при іонному азотуванні в водневих середовищах зменшується на 15–54 %, міцність і пластичність сталей при розтягу відповідно до 18 % та 45 % порівняно з азотуванням безводневому середовищі. Негативний вплив водню на контактну витривалість збільшується зі зменшенням рівня легуваності сталі.

5. На контактну витривалість великий вплив має середовище. Порівняльні випробування на контактну витривалість сталі 40X після нітрогартування показали збільшення довговічності при точковому контакті в мастилi I-20 на 88 %, в абразивному середовищі на 60 %, при сухому терті на 75 %, в дистильованій воді в 2 рази і морській воді в 2,5 рази порівняно з гартованими зразками. При лінійному контакті підвищення контактної витривалості аналогічно складало: в мастилi I-20 на 75 %, в абразивному середовищі на 50 %, при сухому терті на 60 %, в дистильованій воді в 1,9 рази та в 2,1 рази в морській воді.

6. На основі експериментальних досліджень встановлено кореляційний зв'язок між мікротвердістю і залишковими напруженнями стиску в азотованих шарах. Розроблено новий спосіб визначення залишкових напружень та закономірності їх розподілу по глибині азотованого шару за показниками прогину азотованої і неазотованої пластин.

7. Розроблено експериментально-розрахунковий метод визначення залишкових напружень в будь-якій точці поперечного перерізу азотованого шару за показниками мікротвердості. Встановлено вплив технологічних параметрів процесу іонного азотування на залишкові напруження і

можливість оптимізації їх величини за критеріями міцності і довговічності при згині і розтягу. Отримано залежність для визначення оптимальних залишкових напружень при згині, виходячи з умови рівномірності розтягнутих і стиснених волокон.

8. Розроблено комплексний критерій оцінки властивостей композиції «азотоване покриття – основа» та запропоновані його оптимальні значення для різних сталей і технологій нанесення покриттів, що забезпечують максимальне підвищення контактної витривалості трибосистем з азотованими покриттями при терті кочення. Запропонований комплексний критерій дає можливість на основі оцінки властивостей композиції «азотоване покриття – основа» значно зменшити кількість експериментальних випробувань.

9. За результатами промислових випробувань встановлено, що створені нові технології нітрогартування та оксинітрогартування підвищують контактну витривалість сталей в мастилi I-20 в 1,5–1,8 рази при нітрогартуванні та 1,9–2,2 рази при оксинітрогартуванні порівняно з її значенням для гартованих сталей.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Kaplun P., Gonchar V., Bodnar R. Enhancement of steel wear resistance in corrosive and abrasive medium. Interdisciplinary integration of science in technology, education and economy : monograph. Bydgoszcz–Poland, 2013. P. 320-329. *Здобувачем виконані експериментальні дослідження втомного викришування сталей при терті кочення в корозійно-абразивному середовищі.*

2. Каплун П. В., Гончар В. А. Зносостійкість деталей екструдерів і термопластавтоматів в абразивному середовищі : монографія : в 2 ч. / під заг. ред. В. Г. Каплуна. Хмельницький : ХНУ, 2014. 244 с. Ч. I: Зносостійкість деталей екструдерів при виготовленні високоефективних комбікормів. 2014. 133 с. *Здобувачем розроблена технологія нітрогартування сталі X12 та її дослідження в абразивному середовищі.*

3. Ляшенко Б. А., Каплун П. В., Златопольский Ф. И. и др. Поверхностное упрочнение зубчатых колес : монографія. Кировоград : КОД, 2015. 184 с. *Здобувачем проведені дослідження напружено-деформованого стану пластини з дифузійними покриттями при контактному навантаженні.*

4. Каплун В. Г., Каплун П. В. Ионное азотирование в безводородных средах : монографія. Хмельницький : ХНУ, 2015. 344 с. *Здобувачем проведені дослідження впливу технологічних параметрів іонного азотування на*

зносоустійкість сталі ШХ15 при терті кочення та їх оптимізація за критерієм зносоустійкості.

5. Каплун П. В., Паршенко К. А. Підвищення зносоустійкості і довговічності підшипників кочення : монографія. Хмельницький : ХНУ. 2016. 237 с. *Здобувачем виконані всі дослідження з іонного азотування та зносоустійкості сталей 12ХНЗА та ШХ15 при терті кочення та ковзання в мастилі.*

Наукові праці у фахових виданнях:

6. Каплун П. В., Каплун В. Г. Повышение долговечности деталей машин азотированием в плазме тлеющего разряда в безводородных насыщающих средах // Вісник двигунобудування. 2004. № 3/2004. С. 73-76. *Здобувачем проведені металографічні дослідження покриттів.*

7. Каплун В. Г., Каплун П. В., Паршенко А. В. Пути повышения износостойкости и долговечности конструктивных элементов при действии циклических контактных напряжений // *Прогрессивные технологии и системы в машиностроении* : Междунар. сб. науч. трудов. Донецк : ДНТУ, 2005. Вып. 30. С. 97-104. *Здобувачем виконані дослідження мікротвердості зразків з покриттями.*

8. Каплун П. В., Каплун В. Г. Влияние параметров азотированного слоя и остаточных напряжений на напряженно-деформированное состояние конструктивных элементов при изгибе // Вісник двигунобудування. 2006. № 2. С. 66-70. *Здобувачем проведені експериментальні дослідження залишкових напружень в азотованих шарах.*

9. Каплун В. Г., Каплун П. В. Прогрессивные технологии упрочнения поверхности конструктивных элементов // *Современные технологии в машиностроении*. Харьков : НТУ ХПИ. 2007. С. 388-422. *Здобувачем проведені обґрунтування переваг іонного азотування в безводневих середовищах порівняно з традиційною технологією азотування.*

10. Каплун В. Г., Каплун П. В., Шалапко Ю. І. Комплексні технології зміцнення деталей машин // Вісник двигунобудування. 2007. № 2. С. 132-135. *Здобувачем розроблена комплексна технологія зміцнення поверхні деталей машин з використанням електроіскрового легування і іонного азотування.*

11. Kaplun V. G., Kaplun P. V., Urbanyuk E. A. Strengthening of cutting instrument in glow-discharge plasma in hydrogen-free saturation mediums / V. G. Kaplun, P. V. Kaplun, E. A. Urbanyuk // Вісник Хмельницького національного університету. 2007. № 5. С. 75-79. *Здобувачем проведені експериментальні дослідження іонного азотування інструменту.*

12. Ляшенко Б. А., Каплун П. В., Саловых Е. А. и др. Технологическое обеспечение дискретной структуры поверхности при азотировании // *Технические*

системы. 2009. № 2. С. 55-59. *Здобувачем запропоновано спосіб нанесення дискретних азотованих покриттів в тліючому розряді.*

13. Каплун В. Г., Каплун П. В., Паршенко К. А. Дослідження властивостей поверхневих шарів та залишкових напружень сталі Х12 після азотування в тліючому розряді в безводневих середовищах // Вісник Хмельницького національного університету. 2010. № 2. С. 11-18. *Здобувачем проведені дослідження мікротвердості зразків після іонного азотування.*

14. Каплун П. В., Каплун В. Г., Матвіїшин П. В. Розрахунок зносостійкості і довговічності градієнтних покриттів при абразивному зношуванні // Проблеми трибології. 2012. № 1. С. 116-120. *Здобувачем запропонована методика розрахунку зношування азотованих шарів в абразивному середовищі.*

15. Гупка Б., Каплун П., Гупка А. Трибологічні аспекти експлуатаційної надійності важконавантажених пар тертя // Вісник Харківського національно-технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. 2012. Вип. 122. С. 26-34. *Здобувачем проведені експериментальні дослідження пар тертя при високих навантаженнях в умовах граничного тертя в мастилі.*

16. Каплун П. В., Каплун В. Г., Гончар В. А. Математичне моделювання закономірностей розподілу твердості по товщині азотованого шару при азотуванні в тліючому розряді // Вісник Хмельницького національного університету. 2012. № 3. С. 7-11. *Здобувачем розроблена модель розподілу твердості по товщині азотованого шару.*

17. Каплун П. В., Гончар В. А. Зносостійкість сталі 45 в корозійно-абразивному середовищі після іонного азотування // Вісник Хмельницького національного університету. 2013. № 2. С. 57-61. *Здобувачем запропонована технологія іонного азотування зразків.*

18. Каплун П. В., Гончар В. А. Дослідження властивостей азотованого шару сталі ШХ15 та його зношування в абразивному середовищі // Проблеми трибології. 2013. № 1. С. 36-41. *Здобувачем проведені металографічні дослідження зразків після іонного азотування в безводневих середовищах за різними режимами.*

19. Kaplun P., Kaplun V., Gonchar V. Calculation of wear resistance and durability of structural elements with gradient diffusive coatings and metastable phases in the structure of materials // Проблеми трибології. 2014. № 2. С. 12-16. *Здобувачем виконані дослідження градієнта мікротвердості по глибині азотованого шару.*

20. Каплун П. В. Способи підвищення зносостійкості і контактної витривалості зубчастих коліс // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми механічного приводу. 2015. № 35 (1144). С. 67-75.

21. Каплун П. В., Гончар В. А. Влияние ионного азотирования на долговечность открытых зубчатых передач // Проблемы трибологии. 2015. № 2. С. 74-84. *Здобувачем досліджено вплив режимів іонного азотування на зношування в умовах граничного тертя з абразивом.*

22. Каплун П. В., Гончар В. А., Донченко Т. В. Визначення залишкових напружень в азотованих шарах після іонного азотування // Вісник Хмельницького національного університету. 2015. № 6. С. 7-12. *Здобувачем проведено розрахунок залишкових напружень за результатами вимірювань прогину зразків з покриттями.*

23. Каплун П. В., Гончар В. А. Вплив технологічних параметрів іонного азотування на величину залишкових напружень в сталі 45X // Вісник Хмельницького національного університету. 2016. № 1. С. 142-145. *Здобувачем виконано розрахунок залишкових напружень в сталі 45X після азотування.*

24. Каплун П. В., Ляшенко Б. А. Визначення залишкових напружень в азотованих шарах після іонного азотування за показниками мікротвердості // Проблеми міцності. 2016. № 6. С. 56-63. *Здобувачем розроблена методика визначення залишкових напружень за показниками мікротвердості.*

25. Каплун П. В., Ляшенко Б. А. Підвищення зносостійкості та довговічності підшипників кочення іонним азотуванням // Проблеми трибології. 2016. № 2. С. 15-20.

26. Каплун П. В., Гончар В. А. Малоцикловая усталость сталей после ионного азотирования в безводородных средах // Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2016. № 3. С. 95-99. *Здобувачем досліджувався вплив режимів іонного азотування на малоциклову втому в різних середовищах.*

27. Каплун П. В., Гончар В. А., Матвіїшин П. В. та ін. Дослідження зносостійкості сталей в корозійно-абразивному середовищі після зміцнення поверхні іонним азотуванням // Проблеми трибології. 2017. № 2. С. 16-21. *Здобувачем проведено аналіз дослідження зносостійкості в корозійно-абразивному середовищі.*

28. Каплун П. В., Диха О. В., Гончар В. А. Контактна витривалість сталі 40X в різних середовищах після іонного азотування та нітрогартування // Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2017. № 4. С. 42-47. *Здобувачем проведено аналіз і зроблено висновки про вплив середовища на контактну витривалість сталі 40X.*

29. Каплун П. В., Гончар В. А. Комплексний критерій оцінки контактної витривалості конструкційних елементів з азотованими покриттями при терті кочення // Проблеми трибології. 2017. № 3. С. 62-69. *Здобувач розробив комплексний критерій оцінки якості композиції «азотоване покриття – основа».*

В іноземних спеціалізованих періодичних виданнях:

30. Kaplun P., Shalapko Yu., Gonchar V. Effect of surface layers of steel wear resistance in abrasive medium // Technolog. Zilinska univerzita. 3/2013. № 5. P. 235-238. *Здобувачем проведено аналіз впливу технологічних режимів азотування на знос.*

31. Kaplun P., Shalapko Yu., Gonchar V. Effect of surface layers of steel on wear-resistance in abrasive environments // *Problemy nauk stosowanych problems of applied sciences*. Higher school of technology and economics in Szczecin. 2013. T. 1. V. 1. P. 87-92. *Здобувачем проводився аналіз властивостей азотованого покриття на процес зношування в абразивному середовищі.*

32. Kaplun P., Gonchar V., Shalapko Yu. et. al. Improving open toothed wheels // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2015. № 71/1. P. 28-33. *Здобувачем виконувались металографічні дослідження зразків.*

33. Kaplun P. V., Gonchar V. A. Low-cycle fatigue of steels after ion nitriding in hydrogen-free atmospheres. *Materials science*. 2016. Vol. 52. Issue 3. P. 402-406. *Здобувачем досліджувались мікротвердість і фазовий склад зразків. (Scopus).*

34. Kaplun P., Shalapko Yu. Features and advantages ion nitriding in hydrogen-environments. *Zilina : Zilinska Universitat. Technolog.* 4/2016. № 8. P. 27-31. *Здобувачем проводилися вимірювання мікротвердості покриттів.*

35. Kaplun P. V., Lyashenko B. A. Determination of residual stresses in surface layers upon ion nitriding by microhardness values. *Strength of Materials*. 2016. Vol. 48. Issue 6. P. 777-783. *Здобувачем розроблена методика визначення залишкових напружень за показниками мікротвердості. (Scopus).*

Патенти:

36. Пат. № 104570 UA, МПК G01L 1/00. Спосіб визначення модуля пружності дифузійного покриття / П. В. Каплун, В. А. Гончар, А. В. Паршенко. Власник Хмельницький національний університет. у 2015 06997 ; заявл. 14.07.2015 ; опубл. 10.02.2016, Бюл. № 3. 3 с. *Здобувачем розроблена методика досліджень.*

37. Пат. № 116041 UA, МПК G01L 1/06. Спосіб визначення залишкових напружень в азотованих шарах / В. А. Гончар, П. В. Каплун, А. В. Паршенко // Власник Хмельницький національний університет. у 2016 10199 ; заявл. 07.10.2016 ; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9. 4 с. *Здобувачем проведені розрахунки залишкових напружень.*

38. Пат. № 106181 UA, МПК G01L 1/00. Спосіб випробувань на контактну витривалість при коченні з проковзуванням / П. В. Каплун, В. А. Гончар, А. В. Паршенко. Власник Хмельницький національний університет. у 2015 07871 ; заявл. 07.08.2015 ; опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8. 4 с. *Здобувачем розроблена конструкція способу.*

Матеріали та тези конференцій:

39. Каплун П. В., Каплун В. Г., Паршенко А. В. Вплив метастабільної структури залишкового аустеніту на контактну витривалість і довговічність сталі при дії циклічного навантаження // *Машиностроение и техносфера*

XXI века : сб. тр. XIII междунар. науч.-техн. конференції. Донецк, 2006. Т. 2. С. 98-103. *Здобувачем проведені експериментальні дослідження.*

40. Каплун П. В., Каплун В. Г. Інженерія поверхні конструктивних елементів методом хіміко-термічної обробки в плазмі тліючого розряду // *Фізика конденсованих систем та прикладне матеріалознавство* : тези доп. Міжнар. наук.-техн. конференції. – Львів : 2007. С. 87. *Здобувачем досліджені властивості поверхні після іонного азотування в безводневих середовищах.*

41. Каплун П. В., Каплун В. Г. Інженерія властивостей поверхневих шарів зубчастих коліс // *Машиностроение и техносфера XXI века* : сб. тр. XIV междунар. науч.-техн. конференції. Донецк, 2007. Т. 2. С. 117-122. *Здобувачем проведені дослідження мікротвердості поверхні до і після нанесення покриттів.*

42. Каплун В. Г., Каплун П. В., Паршенко А. В. Підвищення довговічності важконавантажених пар кочення за циклічного контактного навантаження // *Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій* / ФМУ ім. Карпенка В.Г. НАН України. 2009. С. 823-828. *Здобувачем проведені експериментальні дослідження при великих контактних навантаженнях пар кочення.*

43. Каплун В. Г., Каплун П. В. Влияние покрытий на контактную выносливость материала при трении качения // Сб. науч. тр. 6-го междунар. симп. по трибофатике. ОИМ НАН Беларуси. Минск, 2010. С. 399-407. *Здобувачем виконані дослідження впливу властивостей дифузійного покриття на напружено-деформований стан композиції «покриття – основа» та її несучу здатність при контактному навантаженні.*

44. Kaplun P. V., Kaplun V. G. Fatigue life of steel elements covered with TiN coatings // *Energy and environmental aspects of tribology* : 8th International symposium “Insuscont” 10. Cracow, Poland. 2010. P. 68-70. *Здобувачем проведено вимірювання мікротвердості покриття.*

45. Каплун П. В., Каплун В. Г. Прогрессивные технологии и качество продукции // *Качество, стандартизация, контроль: теория и практика* : материалы 10-й юбилейной конференции. Киев, 2010. С. 65-68. *Здобувачем зроблено обґрунтування переваг технології іонного азотування в безводневому середовищі.*

46. Каплун П. В., Каплун В. Г., Матвіїшин П. В. Зносостійкість покриттів у корозійно-абразивному середовищі // *Ольвійський форум – 2011* : матеріали наук.-практ. конференції. Ялта, 2011. Т. 11. С. 19-20. *Здобувачем проведені експериментальні дослідження.*

47. Каплун П. В. Контактна витривалість сталі ШХ15 після нітрогартування // *Ольвійський форум – 2012* : тези доп. Міжнар. наук. конференції. Ялта, 2012. Т. 12. С. 20-21.

48. Kaplun P. V., Kaplun V. G. The ways of increasing of wearing capacity and long term of using of constructive elements under the influence of cyclic

contact stress // *Engineering and methodology of modern technology* : monographs. KmNU, 2012. P. 271-282. *Здобувачем досліджено вплив температури на властивості азотованого покриття.*

49. Каплун П. В. Влияние на долговечность деталей машин совместного действия изгиба и фреттинга после ионного азотирования // *Ольвійський форум – 2015* : тези Міжнар. наук.-практ. конференції. Миколаїв : вид-во ЧДУ ім. Петра Могили. 2015. С. 25-28.

50. Каплун П. В., Гончар В. А. Дослідження сталей на малоциклову витривалість при згині в різних середовищах // *12-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові*. Львів, 2015. С. 113-114. *Здобувачем запропоновано метод та розроблена методика досліджень. Проведені вимірювання зносу та фактографічні дослідження зразків різних сталей.*

51. Каплун П. В. Вплив легування поверхні сталей азотом на її зносостійкість в різних умовах експлуатації // *Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій* : тези доп. 3-ї міжнар. інтернет-конференції. Вінниця : ВНТУ, 2015. Ч. 1. С. 14.

52. Каплун П. В. Особливості іонного азотування у безводневих середовищах // *Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів* : тези доп. 9-ї міжнар. конф. студентів та аспірантів (Київ, 14–15 квітня 2016 р.). Київ : КПІ, 2016. С. 10-11.

53. Каплун П. В., Гончар В. А., Донченко Т. В. Вплив режимів іонного азотування на зносостійкість важконавантажених підшипників кочення // *Технічна творчість: Збірник наукових праць*. Хмельницький : ХНУ, 2016. № 1. С. 149-152. *Здобувачем виконані експериментальні дослідження твердості покриття і основи досліджуваних зразків.*

54. Каплун П. В. Вплив іонного азотування на характеристики міцності і пластичності сталей // *13-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові*. Львів, 2017. С. 201-202.

АНОТАЦІЯ

Каплун П. В. Науково-прикладні основи застосування безводневого іонного азотування для підвищення контактної міцності трибосистем. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах. – Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, 2018.

В дисертаційній роботі запропоновано і впроваджено новий комплексний технологічний процес, що включає технології іонного азотування в безводневих середовищах та іонного оксидування, термоактивування азотованих шарів при температурах гартування сталей з

витримкою при даній температурі протягом оптимального часу з наступним гартуванням в мастилi та низькотемпературним відпуском.

Виконанi широкi дослідження процесу iонного азотування в безводневих середовищах для ряду конструкційних сталей з визначенням закономірностей впливу технологiчних параметрiв процесу азотування на товщину, твердiсть, хiмiчний та фазовий склади i залишковi напруження стиску в азотованих шарах. Визначенi оптимальнi технологiчнi режими iонного азотування за критерiями максимального значення товщини та твердостi для кожної сталi. Дослiдженi закономірностi розподiлу мiкротвердостi та залишкових напружень по товщинi азотованих шарiв та розроблено експериментально-розрахунковi методики їх визначення в будь-якiй точцi поперечного перерiзу азотованого шару.

На основi теоретичних дослiджень процесу термоактивування азотованих шарiв розроблено новi технологiї iонного нiтрогартування та оксинiтрогартування. Розроблено унiверсальну експериментальну установку для випробувань на контактну витривалiсть при коченнi, на якiй проведено дослiдження кiнетики зношування та контактної витривалостi сталей з рiзними покриттями в рiзних середовищах. Дослiджено вплив водню на контактну витривалiсть при iонному азотуваннi в водневому середовищi.

Ключовi слова: контактна витривалiсть, знос, iонне азотування, водень, воднева крихкiсть, залишковi напруження, мiкротвердiсть, градиент твердостi, фазовий склад, середовище, оксидний шар, гартування, нiтрогартування, оксинiтрогартування.

АННОТАЦІЯ

Каплун П. В. Научно-прикладные основы применения ионного азотирования для повышения контактной прочности трибосистем. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.04 – трение и износ в машинах. – Хмельницкий национальный университет, г. Хмельницкий, 2018.

В диссертационной работе внедрен новый комплексный технологический процесс, который включает технологии ионного азотирования в безводородных средах и ионного оксидирования, термоактивирования азотированных слоев при температурах закалки сталей с выдержкой при данной температуре в течение оптимального времени с последующей закалкой в масле и низкотемпературным отпуском.

Выполнены широкие исследования процесса ионного азотирования в безводородных средах для ряда конструкционных сталей с определением закономерностей влияния технологических параметров процесса азотирования на толщину, твердость, химический и фазовый составы и остаточные напряжения сжатия в азотированных слоях. Определены оптимальные технологические

режимы ионного азотирования по критериям максимального значения толщины и твердости покрытия для каждой стали. Исследованы закономерности распределения микротвердости и остаточных напряжений по толщине азотированных слоев и разработаны экспериментально-расчетные методики их определения в любой точке поперечного сечения азотированного слоя.

На основании теоретических исследований процесса термоактивирования азотированных слоев разработаны новые технологии ионной нитрозакалки и оксинитрозакалки. Разработана универсальная экспериментальная установка для испытаний на контактную выносливость при качении, на которой проведены исследования кинетики изнашивания и контактной выносливости сталей с различными покрытиями в различных средах. Исследовано влияние водорода на контактную выносливость при ионном азотировании в водородной среде.

Ключевые слова: контактная выносливость, износ, ионное азотирование, водород, водородная хрупкость, остаточные напряжения, микротвердость, градиент твердости, фазовый состав, среда, оксидный слой, закалка, нитрозакалка, оксинитрозакалка.

ABSTRACT

Kaplun P. V. Scientific and applied fundamentals of application of hydrogen-free ion nitriding to enhance contact strength of tribosystems. – Manuscript.

Dissertation for the Scientific Degree of Doctor of Technical Science in the following specialism: 05.02.04 – friction and wear in machines. Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, 2018.

This work solves scientific and technical issue of enhancing contact endurance and durability of coated structural elements at rolling friction by optimizing the properties of cover-base composition under developed concept. This concept features application of gradient coatings with optimal properties and residual compressing strain on the surface under hydrogen-free technology and obtaining of maximum base hardness by thermal processing methods. In order to achieve the set goal, a new integrated technological process has been proposed and implemented. It includes the technology of ion nitriding in hydrogen and hydrogen-free media and ion oxidation, thermal activation of nitrated cases at steel quenching temperature with exposure at given temperature during optimal time followed by quenching in industrial oil and low temperature tempering.

Research on the process of ion nitriding in hydrogen-free media for specific structural steels was performed with determining regularities of influence of technological process parameters of ion nitriding on thickness, hardness, chemical and phase composition, and residual compressing strain in nitrated case. Optimal technological regimes of ion nitriding under criteria of maximum value of

thickness and hardness for each steel were determined. Regularities of distribution of microhardness and residual stresses by nitrated case thickness were researched and experimental and calculation methodology for their determination at any site of nitrated case cross-section was developed.

Based on theoretical research on thermal activation of nitrated cases, new technology of ion nitroquenching and oxyquenching, which satisfy the requirements of the proposed concept. Multipurpose experimental plant for testing contact endurance at rolling friction with sliding was developed. It was used to perform a research on wearability kinetics and contact endurance of various steels in various media (industrial oil, aggressive, abrasion, at dry friction). Effect of hydrogen on contact endurance at ion nitriding in hydrogen media was researched. Developed technology was tested under industrial conditions.

Key words: contact endurance, wear, ion nitriding, hydrogen, hydrogen brittleness, residual stress, microhardness, hardness gradient, phase composition, medium, oxide layer, quenching, nitroquenching, oxynitroquenching.

Підписано до друку 21.03.2018. Формат 30 × 42/4.
Ум. друк. арк. – 1,9. Обл.-вид. арк. – 2,0.
Наклад 100 прим. Зам. № 64/18, 2018

Редакційно-видавничий центр ХНУ
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1
Свідоцтво про внесення в Державний реєстр,
серія ДК № 4489 від 18.02.2013 р.