

## ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора Дворука Володимира Івановича на дисертаційну роботу Беспалова Сергія Анатолійовича «Структурно-морфологічні принципи зносостійкості та їх реалізація в керуванні працездатністю низьколегованих сталей», поданої до захисту у спеціалізовану вчену раду Д26.062.06 Національного авіаційного університету на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах, галузь знань 13 – механічна інженерія

### 1. Актуальність теми дисертації

Надійність близько 90% виробів машинобудування різного призначення визначається працездатністю третьових поверхонь їх кінематичних пар і тому для них першочергове значення має підвищення зносостійкості. Значний ресурс підвищення зносостійкості укладається в матеріалах елементів вузлів тертя. З цієї причини при розробці нової техніки питанням триботехнічного матеріалознавства приділяється дедалі більше зростаюча увага.

До числа таких питань відноситься розкриття ресурсу подальшого підвищення зносостійкості низьколегованих сталей, які, поряд з новими матеріалами, широко застосовуються у вузлах тертя через унікальний спектр фізико-механічних властивостей.

Відомо, що зносостійкість вказаних сталей залежить не лише від їхньої вихідної структури й фазового складу, що забезпечується відповідною термічною обробкою, але також структурних і фазових перетворень, що відбуваються в ході самого процесу тертя і залежать лише від умов роботи рухомого спряження (навантаження, швидкості відносного ковзання, робочого середовища тощо).

Внаслідок хвилястості та шорсткості поверхонь механічний контакт трибоелементів є дискретним і реалізується при терті на окремих ділянках поверхонь – плямах контакту. Морфологічні параметри плям контакту (розмір, розподіл) відіграють важливу роль у формуванні зносостійкості, що, зокрема, підтверджується фактом позитивного впливу періоду припрацювання на зношування вузлів тертя. У зв'язку з цим, ресурс подальшого підвищення зносостійкості низьколегованих сталей вбачається в тому, щоб шляхом термообробки забезпечити в них такі морфологічні параметри твердих фаз, які були б близькими до морфологічних параметрів плям контакту. Однак до сьогодні роль морфологічного фактора у формуванні зносостійкості сталей вивчена недостатньо і у відомих принципах створення зносостійких сталей не враховується.

Виходячи з викладеного вище, вважаю тему даної дисертаційної роботи актуальною.

## **2. Структура й зміст дисертації**

Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, що містять в собі 138 рисунків та 21 таблицю, висновків, списку використаних джерел з 676 позицій (з них 78 латиницею) та 3 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 280 сторінок, а повний обсяг роботи – 439 сторінок друкованого тексту.

У **вступі** відображено основні, передбачені нормативними положеннями ДАК МОН України дані, що характеризують роботу, а саме: обґрунтування вибору теми дослідження, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, мета і завдання дослідження, об'єкт дослідження, предмет дослідження, методи дослідження, наукова новизна отриманих результатів, практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробація результатів дисертації, публікації, структуру та обсяг дисертації.

Недолік вступу: в пункті «Обґрунтування вибору теми дослідження» на стор. 37 перше речення другого абзацу невідкоректовано, тому зміст абзацу не до кінця зрозумілий.

**Перший розділ** присв'ячено аналітичному огляду інформаційних джерел щодо металознавчих аспектів в пошуку шляхів підвищення зносостійкості сталей. Констатовано, що металознавчий метод є розповсюдженим та ефективним засобом керування зносостійкістю вузлів тертя.

Як принципову особливість зовнішнього тертя твердих тіл відмічено дискретність механічного контакту, яка є наслідком хвилястості та шорсткості спряжених поверхонь. Завдяки чому, їх взаємодія відбувається на окремих ділянках – плямах контакту, сукупність яких складає фактичну площу контакту. Дискретність контакту урахована у всіх відомих теоріях тертя та зношування, серед яких найбільш узагальнюючими визнано адгезійну та молекулярно-механічну теорію.

Встановлено, що жодна із стандартних механічних характеристик не має стійкого корелятивного зв'язку із зносостійкістю і тому не може бути критерієм вибору сталей для вузлів тертя. Цей факт вказує на те, що, крім механічних характеристик суттєвий вплив на зносостійкість сталей чинить їхня мікроструктура та фазовий склад.

Проаналізовано відомі методи формування зносостійких структур, а також існуючі уявлення щодо впливу структурних складових та їх морфологічних параметрів на зносостійкість сталей й покриттів різного функціонального призначення. Констатовано відсутність єдиної думки в цих питаннях.

Наведено інформацію стосовно можливостей використання штучних нейронних мереж для цілеспрямованого регулювання структури та фазового складу сталей.

За результатами даного розділу сформульовано наукову проблему, що вирішувалась в дисертаційній роботі, визначено її мету й поставлено завдання, які розв'язувались для досягнення цієї мети.

Недолік розділу: забагато уваги (пп.1.7 – 1.8) приділено керамічним матеріалам, хоча в даній роботі вони не вивчались.

**У другому розділі** описано методичне забезпечення дисертаційного дослідження.

Досліджувались низьколеговані сталі, що широко застосовуються для виготовлення та відновлення деталей вузлів тертя: конструкційні, інструментальні, литі. Механічні властивості, мікроструктура, фазовий склад, а такожі морфологічні параметри структурних складових регулювались режимами термічної обробки сталей.

Після термічної обробки проводились дослідження мікроструктури та механічні випробування на удавлювання, дряпання і тертя ковзання з метою встановлення кореляції між розмірними параметрами мікроструктури та механічними характеристиками сталей.

Оцінка розмірних параметрів мікроструктурних складових проводилась із залученням інформаційних технологій, зокрема, комп'ютерної програми *Image-Pro Plus 4.5*. Тонку структуру сталей вивчали за допомогою растрової та трансмісійної електронної мікроскопії. Склад карбідної фази визначався шляхом рентгеноспектрального аналізу.

Визначення ширини подряпини при випробуваннях на дряпання проводили за допомогою компютерної програми *GetData*.

У третьому розділі викладено результати дослідження впливу характеру структуроутворення на зносостійкість конструкційних низьколегованих сталей.

На прикладі пари тертя «сталь-бабіт» проведено аналіз морфологічних параметрів бабітів і плям контакту при терті, за результатами якого висока зносостійкість вказаної пари пояснюється не лише певними міцнісними характеристиками бабіту але також відповідністю морфологічних параметрів його твердих включень оптимальній схемі контактної взаємодії. Тобто розміри інтерметалідів є близькими до середнього діаметру плям контакту, а відстань між інтерметалідами – до середньої відстані між плямами контакту. На цій підставі сформульовано основні принципи та вимоги до організації зносостійких структур.

Встановлено, що підвищення температури гартування з 860 до 1050 та 1160 °С зменшує твердість за Брінелем відпущеної сталі 40X. Водночас склерометрична мікротвердість вказаної сталі – зростає. При цьому спостерігаються два максимуми мікротвердості. До першого відносяться найближчі один до одного максимуми, середня відстань  $T_1$  між якими практично не змінюється залежно від температури гартування. До другого – максимуми з більшим періодом  $T_2$ , який збільшується при зростанні температури гартування.

Збільшення температури гартування сталі 40X сприяє росту середнього діаметру аустерітного зерна і середнього розміру пакетів мартенситу. При цьому поперечний переріз рейок мартенситу практично не змінюється.

В мікроструктурі загартованої від різних температур сталі 40X присутній мартенсит двох типів – пакетний з рейковою будовою та голчастий. Після відпуску величина зерна в сталі не змінюється, а в голчастих кристалах мартенситу виділяються карбіди. З підвищенням температури гартування розміри голчастих кристалів мартенситу і карбідів зростають.

Встановлено, що вказані вище максимуми склерометричної мікротвердості відповідають середній відстані поміж межами зерен та субструктурних елементів. Кожне наближення індентора до межі зерна супроводжується зменшенням ширини подряпини, а перехід через межу – збільшенням. Виявлено певну циклічність даного процесу. Фактором, який контролює циклічність значень мікротвердості з періодом  $T_1$  після гартування від 860 °C є межі зерен, від 1050 °C – межі зерен та пакетів мартенситу, а від 1160 °C – межі зерен, пакетів та блоків мартенситу. Зміна величини періодів  $T_2$  з підвищенням температури гартування не корелює з жодним з розмірних параметрів структури, що пояснюється зростаючою нерівномірністю розподілу вуглецю.

Підвищення температури гартування до 1160 °C збільшує ймовірність появи гартувальних тріщин в областях з мінімальними значеннями мікротвердості. Це вказує на зв'язок розподілу вуглецю з напруженим станом сталі, який реалізується згідно запропонованої модельної схеми.

Результати трибологічних випробувань показали, що, не зважаючи на зниження твердості, підвищення температури гартування з 860 до 1050 °C сприяє зниженню зносу, зношувальної здатності та коефіцієнту тертя сталі 40X. При подальшому зростанні температури гартування до 1160 °C спостерігалась тенденція до погіршення трибологічних характеристик. Пояснюється це збільшенням розмірів високовуглецевих кристалів голчастого мартенситу та виділенням всередині них на мікродвійникових границях крупніших, порівняно з пакетним мартенситом, карбідів при відпуску через зростаючу нерівномірність розподілу вуглецю. з підвищенням температури гартування до 1050 °C. В результаті, на поверхні тертя утворюються ділянки мікроструктури з підвищеними механічними властивостями, які здатні виконувати роль стійких

до руйнування плям контакту і формувати фактичну площину контакту за оптимальною схемою.

При аналогічному дослідженні сталі 40ХНМ виявлено, що загальний вплив температури гартування з подальшим високим відпуском на мікротвердість та мікроструктуру багато в чому є аналогічним як і для сталі 40Х. Однак, розміри карбідів, при цьому, внаслідок легування молібденом, значно менші, а виділення карбідної фази – більш однорідні. Тому є підстави стверджувати, що морфологічні особливості будови голчастого та пакетного мартенситу впливають на розміри та розподіл карбідної фази після високого відпуску.

Доведено, що ріст температури аустенізації сприяє утворенню областей з підвищеною концентрацією вуглецю, внаслідок чого рівень внутрішніх напружень під час мартенситних перетворень збільшується аж до порогу тріщиноутворення. Легування сталі 40ХНМ нікелем та молібденом гальмує утворення та укрупнення областей з підвищеною концентрацією вуглецю при зростанні температури гартування і тим самим призводить до зниження внутрішніх напружень та зростання її стійкості до утворення гартувальних тріщин порівняно зі сталлю 40Х. Завдяки цьому зносостійкість сталі 40ХНМ вцілому вище, ніж сталі 40Х. Однак при підвищенні температури гартування з 860 до 1050 °С спостерігався значно менший приріст зносостійкості сталі 40ХНМ, ніж у сталі 40Х. Такий результат пояснюється рель'єфнішою гетерогенністю поверхні тертя сталі 40Х у зв'язку з утворенням в її твердому розчині більших за розмірами та кількістю кристалів голчастого мартенситу й карбідної фази. Зменшення зносостійкості обох сталей при подальшому підвищенні температури гартування до 1160 °С також визначається особливостями морфології карбідної фази, зокрема, одночасним збільшенням розмірів та зменшенням кількості вказаної фази.

Таким чином, морфологія, місце виділення, концентрація та механічні властивості карбідної фази є одними з основних факторів, що визначають зносостійкість низьколегованих конструкційних сталей.

Зауваженнями до розділу є:

1. Сформульовані принципи та вимоги до організації зносостійких структур (стор.160-161) мають бути доповнені принципом оборотності структурних і фазових перетворень сталі при терті.

2. Відсутні склерометричні та структурні дослідження конструкційних сталей після зношування.

3. Відсутній аналіз результатів трибологічних досліджень (інтенсивності зношування та коефіцієнту тертя) конструкційних сталей з точки зору виникнення та порушення фрикційних зв'язків при контактній взаємодії, що для вирішення наукової проблеми даної дисертаційної роботи є дуже важливим.

**Четвертий розділ** містить в собі результати вивчення впливу характеру структуроутворення на зносостійкість сталей в литому стані.

Дослідження проводили на зразках, вирізаних з суцільнокатаного вагонного колеса після відновлення методом електродугового наплавлення сталі 08Г2С під шаром флюсу.

За результатами склерометричних та мікроструктурних досліджень, а також їх співставлення між собою встановлено формування в наплавленому шарі гетерогенної за своєю будовою та механічними властивостями орієнтованої структури із значно нижчою зносостійкістю ніж зносостійкість гомогенної структури основного металу.

За результатами трибологічних та склерометричних досліджень, а також їх співставлення між собою встановлено змінну за глибиною зносостійкість та



дисперсність первинних кристалітів наплавленого шару, що знаходяться в прямому зв'язку одне з одним. Максимальне їх значення спостерігається на поверхні наплавленого шару та в зоні його сплавлення з основним металом, а мінімальне – в центрі наплавленого шару.

Показано визначальну роль умов кристалізації, що забезпечують чергування первинних феритних кристалітів та міжосьових ділянок з підвищеним вмістом вуглецю у формуванні зносостійкої структури металу.

Зауваження до розділу:

1. Відсутні склерометричні та структурні дослідження литої сталі після зношування.

2. Не проведено дослідження коефіцієнту тертя та зношувальної здатності литої сталі.

У п'ятому розділі містяться результати вивчення впливу характеру структуроутворення на зносостійкість інструментальних сталей.

Встановлено, що після швидкісної електротермічної обробки сталі Х6ВФ, загартованої від 1100 °С та відпущеної при 200 °С її мікротвердість набагато вище, ніж після стандартної термічної обробки, в той час як твердість за Роквелом залишається такою самою. Структура такої сталі за своїми механічними характеристиками є неоднорідною. Інтенсивність зношування після вказаного зміцнення сталі у 2,2 рази, а при підвищенні температури гартування до 1200 °С – в 1,7 рази нижче, ніж після стандартної термічної обробки. Після гартування від 1060 °С значення інтенсивності зношування коливаються в широкому діапазоні, а їх розбіг перевищує 40%. При цьому максимальні значення близькі до значень зносостійкості сталі після стандартної термічної обробки, а мінімальні – після швидкісного гартування від 1100 °С. Така зміна зносостійкості відбувається циклічно за глибиною поверхневого

шару з періодом  $T_2$ . Причиною цього є наявність в структурі карбідів широкого інтервалу розмірів та неоднорідність їхнього розподілу. Це впливає на фазовий склад сталі після термічної обробки, сприяє утворенню неоднорідної її структури за глибиною та в зоні контактної взаємодії.

Висловлено припущення, щодо можливості формування зазначеними карбідами фактичної площини контакту при терті. Виходячи з цього припущення, істотне підвищення зносостійкості сталі Х6ВФ після гартування від  $1100^\circ\text{C}$  можна пояснити заміною потенційних плям контакту у вигляді тугоплавких легованих карбідів після стандартної термічної обробки на опорні мікроділянки зі структурою залишкових карбідів, дисперсного мартенситу та мартенситу «матриці». Перевагою таких структур є відсутність фазових меж «карбід – матриця» і відповідно зменшення ймовірності викришування крупних карбідів та збільшення опору руйнуванню мікрооб'ємів з підвищеними механічними характеристиками при терті.

Аналогічні висновки також отримано при дослідженні мікроструктури інструментальних сталей 9ХФ і 7ХНМФБ після швидкісного електротермічного зміцнення від температур 750, 800, 850, та  $970^\circ\text{C}$ .

#### Зауваження до розділу:

1. Відсутні склерометричні та структурні дослідження інструментальних сталей після зношування.
2. Не проведено дослідження коефіцієнту тертя та зношувальної здатності інструментальних сталей.

**Шостий розділ** присв'ячено моделюванню трибологічних властивостей низьколегованої конструкційної сталі шляхом прогнозування функціональних властивостей поверхні моделюванням її структурно-морфологічних параметрів за допомогою штучних нейронних мереж.

В результаті експериментальних досліджень мікротопографії контактуючих поверхонь встановлено, що підвищення температури гартування до 1050°C сприяє зниженню шорсткості та підвищенню несучої здатності відпущеної сталі 40X при терті порівняно з загартованою від 860°C, що є причиною зниження коефіцієнту тертя.

Доведено, що морфологія карбідної фази чинить вплив на рівноважну шорсткість, структурно-геометричні параметри та несучу здатність поверхні сталі 40X, що формується під час контактної взаємодії при терті.

Здійснено адаптацію обраної архітектури штучної нейронної мережі – функціоналу множини табличних функцій (ФМТФ), а також доведено спроможність вказаної мережі з модифікованими функціями активізації нейронів з високою точністю розв'язувати інтерполяційні та екстраполяційні завдання.

З використанням експериментально отриманих та змодельованих сертифікованих за нормами ISO параметрів, що характеризують несучу здатність виступів  $Sr_1$  та впадин  $Sr_2$  шорсткості поверхні, спрогнозовано поведінку сталі 40X, загартованої від температур 860, 900, 950, 1050, 1160 та 1200°C та їхньою кореляцією з результатами даної роботи, а також робіт інших дослідників.

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

**Список літературних джерел** налічує 676 найменувань (з них 78 латиницею), що засвідчує широке й ґрунтовне опанування автором наявної інформації з обраної тематики та її аналіз.

У додатках наведено робочі файли для моделювання та навчання штучних нейронних мереж, список публікацій здобувача за темою дисертації, а також відомості про апробацію на практиці результатів дисертації.

### 3. Наукова новизна одержаних результатів

В роботі вирішена важлива наукова проблема, яка полягає в розробці принципів зносостійкості, що враховують зв'язок структурно-фазового й напруженого стану з геометрією контактної взаємодії низьколегованих сталей та виражається у таких наукових положеннях:

1. *Вперше* розроблено основні принципи організації мікроструктури сталей з метою покращення їхніх трибологічних властивостей, які враховують морфологічні особливості будови зміцнювальних фаз, їхній розмір і характер розподілу у твердому розчині, а також параметри мікрогеометрії будови поверхні та умови дискретності контактної взаємодії при терті.

2. *Вперше* встановлено, що для конструкційних сталей 40X та 40XНМ одним з визначальних факторів у розподілі та величині залишкових напружень, які виникають під час гартування, є вуглець. Ріст температури аустенітизації понад  $1000^{\circ}\text{C}$  сприяє утворенню областей з його підвищеною концентрацією, що призводить до зростання внутрішніх напружень під час мартенситного перетворення та після гартування від  $1160^{\circ}\text{C}$  є причинами тріщиноутворень.

Виявлена зростаюча нерівномірність розподілу вуглецю визначає морфологію утвореного мартенситу, збільшуючи кількість (до 15...17% та 12...14% для сталі 40X та 40XНМ відповідно) та розміри кристалів голчастого мартенситу (до 3...5 мкм та до 1,5...3,5 мкм в поперечному перерізі для сталі 40X та 40XНМ відповідно), що своєю чергою впливає на морфологію карбідної фази після високого відпуску. При цьому при відпуску голчастого мартенситу великих розмірів карбідоутворення проходить в середині кристалів на

мікродвійникових межах, утворюючи значні скупчення крупних карбідів (з середнім діаметром 0,12...0,2 мкм) видовженої форми, розмір, форма та місце виділення яких визначає їхню підвищену стійкість до дисоціації при пластичній деформації. Мікроб'єми матеріалу з такою морфологією будови характеризуються наявністю внутрішніх мікроспотворень, які володіють вищими відносно оточуючої мікроструктури механічними характеристиками, зокрема мікротвердістю, та стійкістю до руйнування при терті. Така будова мікроструктури дозволяє зменшити до 19% інтенсивність зношування як зразків досліджуваних сталей, так і до 29% спряженого з ним контртіла через зменшення коефіцієнту тертя з 0,199 до 0,164.

3. *Вперше* виявлено, що морфологія карбідної фази впливає на рівноважну шорсткість, структурно-геометричні параметри та несучу спроможність поверхні тертя сталей, яка формується під час контактної взаємодії, що суттєво позначається на її трибологічних характеристиках. Підвищення температури гартування до 1050 °С сприяє зниженню параметрів шорсткості, а також збільшенню функціональних параметрів несучої спроможності виступів з 10,5 до 16,7% та впадин з 88,3 до 92,8% поверхні тертя відпущеної сталі 40X порівняно із зразками, загартованими від 860 °С.

4. *Отримали подальший розвиток* питання, пов'язані з легуванням сталі 40X нікелем та молібденом, що гальмує утворення ділянок, збагаченим вуглецем, із зростанням температури аустенітизації. Цей процес супроводжується зниженням рівня внутрішніх напружень під час гартування та відповідно зростанням стійкості сталі 40ХНМ до утворення гартувальних тріщин порівняно зі сталлю 40X.

5. *Вперше* показано, що метод склерометрії є чутливим до висококутових та субструктурних меж зерен, а ймовірність виявлення таких фрагментів мікроструктури пов'язана з її розмірними параметрами, рівнем навантаження на

індентор та кроком вимірювання. Показано, що цей метод може бути застосований для оцінки величини, знаку та розмірів полів залишкових напружень, які формуються в структурі сталей під час гартування. Оптимальним для проведення склерометричних досліджень сталей 40X, 40XНМ та Х6ВФ в загартованому та відпущеному станах визначено навантаження на індентор в 20 г, а для сталі 08Г2С у литому стані – 100 г.

6. *Набули подальшого розвитку питання зв'язку зносостійкості сталей у литому стані з дисперсністю її дендритної структури. Виявлено, що збільшення у 2,5 рази кількості осей дендритів та відповідно зменшення відстані між ними з 500...600 до 200...250 мкм при їхній орієнтації перпендикулярно до поверхні контактної взаємодії сприяє зменшенню на 15,9% масової інтенсивності зношування з  $13,7 \cdot 10^{-8}$  до  $11,5 \cdot 10^{-8}$  сталі 08Г2С у литому стані, а порівняно з гомогенною структурою – на 27,0%.*

7. *Розвинуто практику використання комп'ютерного моделювання для прогнозування трибологічних властивостей сталей. Шляхом поєднання результатів експериментів та моделювання з використанням інтелектуальних систем на основі штучних нейронних мереж, побудованих на моделі функціоналу на множині табличних функцій, було спрогнозовано зміну функціональних параметрів несучої спроможності поверхні та відповідно до них і трибологічні характеристики відпущеної сталі 40X залежно від температури її гартування. Встановлено, що відповідно до отриманої моделі найкращі показники зносостійкості досягаються при гартуванні сталі 40X в температурному проміжку від 1050 до 1100°C, а найгірші – при 950°C та понад 1200°C.*

#### **4. Практичне значення одержаних результатів**

Запропоновано основні принципи та вимоги до організації зносостійких структур, які дають змогу при цілеспрямованому формуванні структурно-

фазового та напруженого стану покращувати трибологічні характеристики сталей.

Науково обґрунтовано та розроблено технологічні режими термічної обробки для підвищення зносостійкості конструкційних низьколегованих та інструментальних сталей.

На підставі дослідження закономірностей впливу температурно-часових умов гартування на структурно-фазовий та напружений стан покращуваних сталей на Приватному акціонерному товаристві «Київський електровагоноремонтний завод» рекомендовано оптимальні режими термічного оброблення валу вузла малої шестерні тягового редуктора та шестерні компресора ЕК-7 електропоїзда ЕР-9М з метою покращення їхніх експлуатаційних характеристик.

Основні результати роботи впроваджено у навчальний процес кафедри інженерної механіки Української академії друкарства при викладанні лекційних курсів для підготовки бакалаврів та магістрів за напрямками 131 «Прикладна механіка» та 133 «Галузеве машинобудування».

## **5. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій**

Розроблені в дисертаційній роботі наукові положення, висновки та рекомендації є обґрунтованими, що підтверджується:

- використанням наукових положень трибології, триботехнічного матеріалознавства, матеріалознавства і фізики металів;
- застосуванням апробованих сучасних методик дослідження структури і фізико-механічних властивостей сталей;
- відповідністю теоретичних та експериментальних результатів, отриманих в дисертаційній роботі.

- залученням сучасних комп'ютерних технологій моделювання для прогнозування трибологічних властивостей сталей;
- обробкою та аналізом результатів дослідження за допомогою комп'ютерних програм.

#### **6. Достовірність та новизна висновків і рекомендацій**

Завдання, що поставлені в дисертаційній роботі для досягнення її мети впливають з детального аналізу літературних джерел, де представлено сучасні уявлення та результати досліджень щодо геометрії поверхонь та контактної взаємодії твердих тіл під час тертя, зв'язку зносостійкості з механічними властивостями сталей, методів формування зносостійких структур в сталях, а також підвищення зносостійкості матеріалів шляхом зміцнення та модифікування поверхонь тертя. Розв'язання цих завдань спирається на робочу гіпотезу, закони трибології й матеріалознавства, а також ідею роботи, яка полягає в пошуку й формуванні підходів та вимог до організації мікроструктури низьколегованих сталей, що забезпечать підвищену зносостійкість вузлів тертя, які б пов'язували одне з одним внутрішню будову сталей з геометрією їх контактної взаємодії.

Експериментальні дослідження низьколегованих сталей виконувались в лабораторних умовах з використанням сучасних теоретичних та інструментальних методів дослідження. Отримані результати оброблялись і аналізувались за допомогою комп'ютерних технологій. Це свідчить про достовірність висновків і рекомендацій, що представлені в дисертаційній роботі.

Вказані висновки і рекомендації мають новизну, оскільки вони є складовими нового вирішення актуальної наукової проблеми з розробки принципів зносостійкості, що враховують зв'язок структурно-фазового й



напруженого стану з геометрією контактної взаємодії низьколегованих сталей. Елементи цього вирішення захищено 2 патентами України.

#### **7. Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях**

Основні результати дисертації опубліковані в 42 наукових працях, включаючи 24 статті у наукових фахових виданнях, з яких 12 входять до наукометричних баз даних Scopus та/або Web of Science, 2 патенти України, 16 тез доповідей на конференціях різного рівня.

Це свідчить про повноту викладу результатів дисертації в опублікованих працях.

Автореферат дисертації за викладом та змістом відповідає дисертаційній роботі, а також вимогам ДАК України.

*Зауваження:* серед опублікованих наукових праць немає жодної публікації у фахових виданнях суто трибологічного профілю.

#### **8. Зауваження по дисертації й автореферату**

1. У вступі в пункті «Обґрунтування вибору теми дослідження» (стор. 37) перше речення другого абзацу не відкоректовано, тому зміст абзацу не до кінця зрозумілий.

2. В огляді інформаційних джерел забагато уваги (п.1.7 – 1.8) приділено керамічним матеріалам, хоча в даній роботі вони не вивчались.

3. Ураховуючи дуже високий рівень температур спалаху на фрикційних зв'язках, сформульовані принципи та вимоги до організації зносостійких структур (стор.160-161) мають бути доповнені принципом оборотності структурних і фазових перетворень сталі при терті.

4. Не проведено аналіз результатів трибологічних досліджень (інтенсивності зношування та коефіцієнту тертя) конструкційних, литих та

інструментальних сталей з точки зору виникнення та порушення фрикційних зв'язків при контактній взаємодії, що для вирішення наукової проблеми даної дисертаційної роботи є дуже важливим.

5. Відсутні склерометричні та структурні дослідження конструкційних, литих та інструментальних сталей після зношування.

6. Відсутні дослідження коефіцієнту тертя та зношувальної здатності литих та інструментальних сталей.

7. Серед опублікованих наукових праць немає жодної публікації у фахових виданнях суто трибологічного профілю.

### **9. Загальний висновок по дисертаційній роботі**

Дисертаційна робота Беспалова Сергія Анатолійовича «Структурно-морфологічні принципи зносостійкості та їх реалізація в керуванні працездатністю низьколегованих сталей» є актуальною за темою науково-дослідною працею, в якій одержані нові обгрунтовані та достовірні наукові результати, що мають практичне значення у розкритті ресурсу підвищення зносостійкості низьколегованих сталей шляхом регулювання режиму термічної обробки.

Напрямок проведеного дослідження відповідає паспорту спеціальності 05.02.04 – тертя та зношування в машинах.

Основні результати роботи достатньо повно опубліковано у фахових виданнях, в тому числі тих, що входять до міжнародних науково-метричних баз й апробовано на наукових конференціях різного рівня.

Автореферат дисертації за викладенням та змістом відповідає дисертаційній роботі.

Недоліки, які відмічено в зауваженнях, в основному скеровані на вдосконалення та продовження роботи і не знижують її високий науковий рівень.

Таким чином, дисертація Беспалова Сергія Анатолійовича «Структурно-морфологічні принципи зносостійкості та їх реалізація в керуванні працездатністю низьколегованих сталей» є завершеною науково-дослідною роботою, в якій на підставі особисто виконаних здобувачем досліджень отримано нові теоретичні й експериментальні результати, що дозволили розв'язати актуальну наукову проблему з розробки принципів зносостійкості, що враховують зв'язок структурно-фазового й напруженого стану з геометрією контактної взаємодії низьколегованих сталей.

Вона відповідає вимогам, що висуваються до докторських дисертацій згідно п.п. 9,11,12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету міністрів України від 24 липня 2013 р. №567, а її автор Беспалов Сергій Анатолійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.04. – тертя та зношування в машинах, галузь знань 13 – механічна інженерія.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор, професор

кафедри загальної та прикладної фізики

Національного авіаційного університету



Дворук В.І.



Дворук В.І.

з а с в і д ч у ю

Вчений секретар

Національного авіаційного університету

