

Голові спеціалізованої  
вченої ради Д26.062.06  
Національного авіаційного університету  
м. Київ, пр-т Любомира Гузара, 1

## Відгук

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
**Беспалова Сергія Анатолійовича**  
«Структурно-морфологічні принципи зносостійкості та їх реалізація  
в керуванні працездатністю низьколегованих сталей»,  
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

Вдосконалення матеріалів тертя, не дивлячись на сьогоденні труднощі, являє необхідну складову технічного і соціального розвитку як науки, так і суспільства в цілому. Підвищення зносостійкості використовуваних матеріалів та конструкцій з них, відіграє ключову роль у сучасних технологіях та має вирішальне значення для рішення основних соціально-технічних і економічних проблем країни.

Розроблення структурно-морфологічних принципів зносостійкості, що викладені в роботі, та їх реалізація в керуванні працездатністю низьколегованих сталей значною мірою являє сукупність результатів, як об'єктивної форми необхідності отримання нових знань в інтересах забезпечення високого рівня зносостійкості та надійної працездатності триботехнічних сполучень, що робить тематику дисертаційного дослідження своєчасною і актуальною.

Актуальність теми підтверджена також і тим, що вона виконувалась згідно постанов у рамках п'яти відомчих бюджетних тем та трьох цільових комплексних програм НАН України, в яких визначено напрямки важливих державних науково-прикладних досліджень, що стали основою отриманих результатів дисертаційної роботи, спрямованих на досягнення сформульованої наукової проблеми.

**Наукова новизна** отриманих результатів, на самперед, пов'язана із узагальненням сукупності отриманих положень і закономірностей, що визначають загальний внесок надбаних теоретичних і експериментальних знань до науки і практики, та розкривають логічно упорядковану систему взаємопов'язаних тверджень, які обґрунтовують з єдиних методологічних позицій структурно-морфологічні принципи зносостійкості на базі врахування зв'язків структурно-фазового

складу та напруженого стану з геометрією фрикційного контакту низьколегованих сталей, при цьому, слід визначити, що:

- розроблено і сформульовано в рамках концепції модернізації та інноваційного розвитку основні принципи будови, взаєморозташування і зв'язки певних складових частин мікроструктури низьколегованих сталей;

- встановлено вплив внутрішніх складових факторів сталей на їх властивості та розроблено загальні принципи організації мікроструктури з метою покращення їх триботехнічних властивостей;

- обґрунтовано на базі експериментальних випробувань виняткове значення найбільш розповсюдженої технологічної домішки сталей-вуглецю на розподіл та величину залишкових напружень. Відпрацьовано режими термічної обробки, що впливають на морфологію карбідної фази та мінімізацію триботехнічних параметрів сталей;

- досліджено особливості морфології карбідних фаз на вплив фізико-механічних властивостей поверхневих шарів сталей та встановлено оптимальні режими їх термічної обробки з метою підвищення опору зносу;

- доведено вплив легування на процес структуроутворення сталі, що супроводжується зниженням рівня внутрішніх напружень при гартуванні та зростанням поверхневої міцності, що обумовлює анігіляцію ендегенних екстремальних дефектів;

- встановлено адекватну чутливість склерометричних вимірювань до визначення складових на структурному рівні, визначено, що ймовірність виявлення мікроструктури пов'язана з технікою вимірювання. Наведено оптимальні умови оцінки міцності досліджуваних сталей;

- розкрито подальший зв'язок зносостійкості з дисперсністю дендритної структури та встановлено оптимальне співвідношення структурних складових сталей у литому стані;

- розширено потенційні можливості комп'ютерного моделювання шляхом поєднання результатів експерименту і моделювання з використанням інтелектуальних систем на основі штучних нейтронних мереж. Зпрогнозовано причинно-наслідкові залежності між експлуатаційними і технологічними факторами, що враховують комплексний підхід до оцінювання якості зносостійкості випробуваних сталей.

**Положення наукової новизни**, представлені в дисертаційній роботі Беспалова С.А., в достатній мірі обґрунтовані, їх достовірність підтверджена тим, що приведені теоретичні та експериментальні дослідження не суперечать один одному, а їх результати спираються на сучасні досягнення фізико-хімічного структурного аналізу та на апробовані методи обробки експериментальних даних. Також наукова значимість отриманих автором структурно-морфологічних принципів зносостійкості підтверджена публікаціями у вітчизняних та зарубіжних наукових виданнях.

Крім того, положенням наукової новизни досліджень відповідає системність та комплексний характер роботи, що дозволило автору логічно і послідовно упорядкувати складні процеси випробувань на спільній методично-інформаційній базі, яка має внутрішню єдність і свідчить про професійну підготовленість автора.

Слід зазначити, виробнича цінність науково-дослідної роботи полягає в тому, що її результати перевірені на виробництві і довели спроможність ефективно працювати в умовах експлуатації.

**Дисертація, що рецензується, складається** зі вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаної літератури з 675 найменувань та 3 додатків. Загальний обсяг включає 435 сторінок друкованого тексту, містить 138 рисунків, 21 таблицю.

**Перший розділ** присвячено стану досліджень в галузі сучасного триботехнічного матеріалознавства та наведено результати огляду джерел за темою дисертаційної роботи. При цьому критичне вивчення літератури підтверджує, що дослідження ролі структурних складових, які визначають зносостійкість сталей, є одним із важливих напрямів сучасної науки тертя та зношування твердих матеріалів. На основі загального аналізу визначені основні напрями теоретичних і експериментальних досліджень.

**У другому розділі** надано матеріали та методики досліджень. Представлено методи сучасних фізичних випробувань, що застосовувались в роботі. Підкреслено, що для прогнозування триботехнічних властивостей досліджуваних сталей використали інтелектуальну систему на основі штучного нейронного моделювання.

**Третій розділ** присвячено впливу характеру структуроутворення на зносостійкість конструкційних низьколегованих сталей та визначено шляхи формування їх мікроструктури для підвищення зносостійкості. Проаналізовано залежність зносостійкості від розмірних параметрів мікроструктури сталі, при цьому встановлена її залежність зі схемою розташування плям контакту шорстких поверхонь. На базі експериментальних та теоретичних досліджень сформульовано основні закономірності та вимоги до організації зносостійких структур. Наведена схема модельних уявлень про взаємодію напружень і їх взаємозв'язок з розподілом вуглецю. Встановлена залежність інтенсивності зношування від температури гартування сталі 40X. Визначено закономірності структуроутворення і її вплив на зносостійкість сталі 40ХНМ в різних температурних режимах. Доведено вплив структурно-морфологічних факторів на міцність і опір руйнуванню сталей в умовах тертя та зношування.

**Четвертий розділ** присвячено вивченню характеру структуроутворення на зносостійкість сталі в литому стані. Визначено, що збільшення дисперсності наближає структуру до вимог оптимальної взаємодії в умовах тертя та сприяє під-

вищенню зносостійкості наплавленого шару. Представлені експериментальні дослідження формування в наплавленому шарі гетерогенної орієнтованої структури, яка сприяє суттєвому зменшенню зношування, вивчено її будову, механічні властивості, що обумовлюють структурно-морфологічні принципи зносостійкості.

**У п'ятому розділі** викладені дослідження впливу характеру структуроутворення на зносостійкість інструментальних сталей. Встановлено, що використання швидкісного нагріву надає можливість одержувати негомогенні стани, в яких після гартування в місцях розташування карбідів фіксується залишковий аустеніт або більш дисперсний і міцний мартенсит. Доведено, що гартування з підвищеними швидкостями нагрівання з міжкритичного інтервалу температур впливає на фазовий склад та обумовлює формування навколо карбідних включень ділянок аустеніту, що негативно впливає на опір зношування. При цьому швидкісна термічна обробка сталі від температури, які перевищують значення  $A_{c3}$ , дозволяє зберігати гетерогенність структури у вигляді «залишку карбідів - дисперсний мартенсит - мартенсит», яка за розмірними параметрами близька до оптимальної модельної схеми контактної взаємодії та характеризується високим опором зносу.

**У шостому розділі** розглянуто прогнозування властивостей досліджуваних сталей за допомогою комп'ютерного моделювання. Здійснено моделювання триботехнічних властивостей низьколегованої сталі шляхом прогнозування функціональних властивостей поверхні, її структурно-геометричних параметрів за допомогою використання штучних нейронних мереж. Встановлено, що морфологія карбідної фази впливає на несучу спроможність сталі та позначається на її триботехнічних властивостях. Спрогнозовано зміну фізико-механічних характеристик поверхні тертя та пов'язаної з нею динаміку опору зношуванню в залежності від температури гартування. Підкреслено, що використаний програмний продукт T-Controller User Manual забезпечив зменшення похибки прогнозування у 1,5 рази порівняно з традиційними методами.

**Висновки** дисертаційної роботи ґрунтуються на відображенні основних отриманих наукових та практичних результатів дослідження.

**Щодо оцінки змісту дисертації, її завершеності в цілому**, слід зауважити, що робота є закінченим науковим дослідженням, має внутрішню єдність та відповідає критеріям цілісності, системності та зв'язності. Мовне оформлення раціональне і знаходиться в межах наукового стилю. Автором продемонстровано уміння стисло і логічно, аргументовано і конкретно викладати матеріал. Зміст автореферату відповідає основним положенням дисертаційної роботи, результати якої повною мірою викладені в наукових фахових виданнях згідно вимог ДАК МОН України.

Разом з тим у дисертаційній роботі, як і в будь-якій значній та завершеній праці, на мій погляд, є окремі зауваження. На деяких з них зосереджу увагу:

- в написаній, як зазначалось, чітко, ясно та добре ілюстрованій роботі зустрічаються, нажаль, помилки, невдалі висловлювання, наприклад, сторінки 43, 87, 136, 239 та інші.
- у другому розділі надана головним чином не методика дослідження, а описані переваги та можливості застосованих методів;
- не достатньо ясно, який метод оцінки вимірювання фактичної площі контакту використано у дослідженнях, крім того, відсутня дискретна модель шорсткої поверхні;
- відсутні визначення як кількості вуглецю в твердих розчинах на основі  $\alpha$ - та  $\gamma$ - заліза, що оцінюється по відносному змінюванню параметра кристалічної ґратки, так і оцінка кількості вуглецю в карбідних частках, яку отримують на основі хімічного складу карбіду, типу кристалічної ґратки та об'ємної долі часток карбідної фази;
- не встановлено методами дифракційної мікроскопії формування градієнтних структурно-фазових станів та не акцентовано в повній мірі, що основними положеннями, які відповідають за підвищення міцності зміцненого шару, є субструктурні і деформаційні механізми;
- не встановлено мікроструктуру сталі в умовах пластичної деформації, яка характеризується дефектним структурним станом з високими значеннями ротора кривизни кристалічної ґратки та значною щільністю границь з перемінними векторами розорієнтації, що має очевидну наукову і практичну значимість;
- не звернено увагу, що на триботехнічні властивості сталей впливають головним чином, по-перше, структурні і фазові складові, по-друге, якість вторинних структур, і їх вивчення є відповідальним фактом фізико-хімічного аналізу та має не будь-яке прикладене значення для забезпечення нормальних механохімічних процесів;
- не подана у явному вигляді конкретна залежність інтенсивності зношування сталей від величин, знаку та розподілу залишкових напруг;
- відсутні діапазони навантаження, температур, при яких має місце явище структурної пристосованості, яке відповідає нормальному механохімічному процесу зношення досліджуваних сталей;
- для низьколегованих сталей, як відомо, кількісним параметром, що характеризує зміну структури є тензор щільності дислокацій, спроба посилення на який в роботі відсутня;
- не визначені дослідження одного із триботехнічних положень підвищення працездатності поверхонь, а саме, забезпечення позитивного градієнтних механічних властивостей по глибині;
- не обґрунтовано критерії, за якими вибрано архітектуру сітки, а також не подано парадигму навчання;

- розмір зерна, як підкреслено в роботі, важлива характеристика якості і властивостей сталей, яка впливає на їх міцність, але не зауважено, що ще в більшій мірі його розмір впливає на в'язкість та пластичність.

**Загальний висновок.** Не дивлячись на наведені зауваження, які значною мірою мають дискусійний характер і суттєво не впливають на загальний зміст отриманих результатів, враховуючи можливим визначити позитивну оцінку важливої роботи, виконаної здобувачем і представленої в його дисертації.

Дисертаційна робота Беспалова С.А. «Структурно-морфологічні принципи зносостійкості та їх реалізація в керуванні працездатністю низьколегованих сталей» є закінченою кваліфікаційною науковою працею, в якій на основі виконаних автором досліджень розроблені і впроваджені концептуальні положення, сукупність яких складає обґрунтований внесок в розвиток науки про тертя і зношення та сприяє розв'язанню значної прикладної проблеми керування підвищенням працездатності деталей із низьколегованих сталей, поверхні яких підлягають триботехнічним навантаженням.

Таким чином, дисертаційна робота Беспалова Сергія Анатолійовича за актуальністю, новизною теоретичних і експлуатаційних результатів, високим рівнем досліджень цілком підпадає під вимоги ДАК МОН України, які пред'являються до докторських дисертацій та відповідає профілю спеціальності 05.02.04 – тертя та зношення в машинах, а її автор, Беспалов С.А., заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук.

Провідний науковий співробітник  
ІТТФ НАН України,  
доктор техн. наук, професор

 В.В.Щепетов

