

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Кулика Володимира Володимировича**

“Розроблення концепції створення високоміцних колісних сталей”, що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю

**05.02.01 – матеріалознавство**

### **Актуальність теми дисертації**

Україна є третім за величиною виробником суцільнокатаних залізничних коліс в світі та постачає їх в понад 80 країн. Для забезпечення конкурентноздатності цього виду продукції вона повинна володіти високим терміном експлуатації та надійністю. Тому проблема створення сталей для залізничних коліс з підвищеним ресурсом експлуатації є актуальною.

Основними чинниками, що визначають ресурс залізничних коліс є стоншенням товщини ободу за рахунок експлуатаційного зносу і обточування для усунення пошкоджень поверхні кочення внаслідок контактної втоми. Вітчизняні та закордонні розробники колісних сталей для підвищення ресурсу коліс збільшували вміст вуглецю, що дозволяло підвищити зносостійкість. Проте зросла пошкодженість поверхні кочення таких коліс через утворення повзунів та вищербин. Тому потрібно розробляти підходи до створення високоміцних сталей залізничних коліс, які б забезпечували оптимальне поєднання їх характеристик опору зношуванню і контактно-втомній пошкодженості. У цьому зв'язку представлена дисертаційна робота, спрямована на розроблення вимог до комплексу механічних характеристик високоміцних колісних сталей та обґрунтування хімічного складу таких сталей для залізничних коліс нового покоління вирішує важливу з наукової і практичної точок зору проблему.

**Загальна характеристика роботи.** Дисертаційна робота Кулика В.В. складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел

та додатків. Робота викладена на 387 сторінках, містить 158 рисунків і 33 таблиці. Список використаних джерел включає 465 найменувань.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, зазначено зв'язок роботи з тематичними планами НАН і МОН України, сформульовано мету і завдання дослідження, відображену наукову новизну та практичну цінність отриманих автором результатів, вказано особистий внесок здобувача та наведено відомості про апробацію, впровадження та публікацію основних результатів дисертаційного дослідження.

У **першому розділі** автором проаналізовано дослідження вітчизняних та закордонних авторів стосовно проблеми довговічності залізничних коліс, наведено стандарти для залізничних коліс різних країн і їх класифікацію, оцінено вплив особливостей експлуатації коліс на їх пошкоджуваність та зазначено типи пошкоджень поверхні кочення таких коліс, розглянуто колісні сталі різних структурних класів та вплив експлуатаційних чинників на механічну поведінку цих сталей. Базуючись на аналізі сучасних літературних джерел дисертантом сформульовано основні задачі дослідження.

У **другому розділі** наведено матеріали та методики досліджень, зокрема використання оптичної, електронної трансмісійної і сканувальної мікроскопії та рентгеноструктурного аналізу досліджуваних сталей. Значну увагу приділено визначенню механічних властивостей колісних сталей за різних умов експлуатації залізничних коліс, зокрема, міцнісним характеристикам за температур від 20 до 800°C та характеристик циклічної тріщиностійкості: за різної асиметрії циклу навантаження у повітрі при 20°C і у парах рідкого азоту при -40°C; у 3,5%-му водному розчині NaCl та дистильованій воді при 20°C; за впливу температурно-силових чинників під час гальмування. Контактно-втомну пошкоджуваність поверхні кочення модельних зразків колісних сталей встановлювали за допомогою спеціально спроектованого випробувального стенду.

У **третьому розділі** проведено аналіз пошкоджуваності поверхні кочення коліс зі стандартних сталей марок 2 та Т і встановлено їх характеристики роботоздатності. Показано, що більшість експлуатаційних

пошкоджень поверхні кочення коліс, які надходять в ремонт належить до вищербин і повзунів. Порівняння пошкодженості коліс залежно від марки сталі виявило, що в колесах зі сталі марки Т повзунів і, особливо, вищербин значно більше, ніж у колесах зі сталі марки 2. Оцінено схильність сталей до формування повзунів на підставі температурної залежності механічних характеристик досліджуваних сталей марки 2 та Т. Досліджено вплив термосилових чинників під час гальмування на структуру та механічні властивості колісних сталей марок 2 та Т. Порівняння отриманих закономірностей для цих сталей показує, що негативні наслідки впливу термосилових чинників під час гальмування значно більші для сталі марки Т, де вміст вуглецю вищий порівняно зі сталлю марки 2.

Проаналізовано здатність колісних сталей формувати на своїй поверхні захисні плівки у різних корозивних середовищах, що визначає їх опірність до впливу середовища. За швидкістю утворення захисної плівки проведено ранжування колісних сталей за цією здатністю. Запропоновано схеми утворення вищербин на поверхні кочення коліс, коли кінетику цього процесу визначає тривалість різних стадій пітингутворення та відшарування внаслідок зародження і росту втомних тріщин за нормальноговідриву та поперечного зсуву. Запропоновано нову концепцію розроблення високоміцних колісних сталей, яка базується на підходах структурної механіки руйнування.

**У четвертому розділі** вивчено шляхи підвищення роботоздатності високоміцних колісних сталей. На першому етапі досліджено графітовані сталі різного хімічного складу, що відповідає класам доевтектоїдних, евтектоїдних і заевтектоїдних сталей. Показано, що попри низьку високотемпературну пластичність, відсутність негативного впливу низької температури і корозивного середовища на циклічну тріщиностійкість доевтектоїдної графітованої сталі, за характеристиками міцності, циклічної тріщиностійкості і опором пошкоджуваності вона не задовольняє вимоги згідно розробленої концепції створення нових колісних сталей. На другому етапі проведено аналіз роботоздатності колісних сталей з твердорозчинним

зміненням за рахунок підвищеного вмісту кремнію та марганцю (сталь марки К). Встановлено позитивний вплив кремнію і марганцю на гомогенізацію структури металу ободу під час термообробки колеса. Як і для коліс марок 2 та Т виявлено також негативний прояв процесу гальмування на сталь марки К. Показано, що сталь з твердорозчинним зміненням має високий опір зношуванню, але низький опір пошкоджуваності, подібно до високоміцних сталей марки Т. Отже вона потребує оптимізації за опором пошкоджуваності. На третьому етапі вивчено сталі з дисперсійним нітридним зміненням (Н<sub>2</sub>-Н<sub>5</sub>). Їх мікролегували ванадієм і азотом, а сумарний вміст цих елементів характеризували параметром [V-N]. Найвищим значенням границі міцності володіє сталь при [V-N] = 22,1 · 10<sup>4</sup>%. На підставі діаграми експлуатаційної надійності констатовано, що сталь з дисперсійним нітридним зміненням за її оптимального легування має високий опір пошкоджуваності, але низький опір зношуванню. На четвертому етапі досліджено сталі за одночасного поєднання твердорозчинного і нітридного змінення (Ф1 та Ф2). Показано, що сталь Ф2 за одночасного поєднання твердорозчинного і нітридного змінення володіє оптимальними показниками опору зношуванню та опору пошкоджуваності.

У п'ятому розділі проведено оцінювання роботоздатності високоміцних залізничних коліс після ремонтної наплавки, коли в зоні термічного впливу колеса залежно від швидкості охолодження формується структура, схильна до крихкого руйнування шляхом полегшеного зародження і росту тріщин. Проведено пошук ефективних режимів наплавлення та охолодження відновлюваних коліс, щоб забезпечити конструкційну міцність металу в зоні термічного впливу, зокрема, підвищену тріщиностійкість у високоміцному стані. Термообробку виконували за різними схемами, які відображені у дисертаційній роботі, застосовуючи відому та модифіковану автором Q-n-P-обробку, а також обробку, яка забезпечує тільки релаксацію напружень II роду під час формування бейнітно-мартенситної структури сталі. Суть Q-n-P-обробки полягала в зміні температурно-часових параметрів з метою забезпечення різного вмісту

залишкового аустеніту, який під випливом механічних напружень перетворюється в мартенсит деформації, що зумовлює підвищення тріщиностійкості сталі. Модифікована автором Q-n-P-обробка передбачає додаткову витримку між точками початку ( $M_s$ ) і кінця ( $M_f$ ) мартенситного перетворення упродовж 2 год, щоб знизити локальні внутрішні напруження. Порівняно з вихідним станом традиційна Q-n-P-обробка забезпечила зростання пластичності сталі та характеристик циклічної тріщиностійкості, що підтверджує реалізацію тут відомого TRIP-механізму пластифікації сталі внаслідок деформаційного мартенситного перетворення залишкового аустеніту. Модифікована обробка (режим № 4) забезпечує подальше зростання пластичності сталі та характеристик циклічної тріщиностійкості. Найбільше зростання характеристик циклічної тріщиностійкості забезпечує режим термічної обробки, який дозволяє знизити напруження II роду під час формування бейнітно-мартенситної структури сталі. На запропонований спосіб підвищення циклічної тріщиностійкості зони термічного впливу наплавок отримано патент України.

**Висновки** повністю відображають основні результати дисертаційної роботи.

**Додатки** містять патенти України на винахід і корисну модель; акти використання результатів з Фізико-технологічного інституту металів і сплавів НАН України та Інституту електрозварювання ім. Е.О. Патона НАН України; відомий нормативний документ “Додаткові вимоги до сталей суцільнокатаних високоміцних залізничних коліс”, погоджений Головним управлінням вагонного господарства Укрзалізниці; список опублікованих праць за темою дисертації.

#### **Ступінь обґрутованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих в дисертації, їх достовірність**

Обґрутованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи Кулика В.В. забезпечені глибоким аналізом літературних джерел, чітким формулюванням проблеми та шляхів її

вирішення. Достовірність наукових положень дисертації підтверджується результатами великого обсягу експериментальних досліджень та забезпечується використанням фундаментальних положень структурної механіки руйнування матеріалів, а також зіставленням результатів з результатами інших дослідників. Інтерпретація результатів дослідження узгоджується з існуючими теоретичними розробками в галузі матеріалознавства. Отримані в роботі результати обговорені на авторитетних міжнародних і вітчизняних наукових конференціях та симпозіумах.

### **Наукова новизна отриманих у роботі результатів**

Автором розроблено нову концепцію створення високоміцних колісних сталей, яка базується на діаграмах конструкційної міцності і експлуатаційної надійності з урахуванням механізмів руйнування за нормальноговідрибу і поперечного зсуву та передбачає забезпечення оптимального поєдання їх характеристик опору зношуванню і контактно-втомній пошкодженості за умови зниженого вмісту вуглецю в сталі.

Встановлено, що оптимальним поєданням характеристик міцності і циклічної тріщиностійкості та опору зношуванню і пошкоджуваності володіють комплекснолеговані сталі з твердорозчинним та дисперсійним зміцненням за зниженого вмісту вуглецю.

Автором вперше показано, що підвищення циклічної тріщиностійкості зони термічного впливу ремонтної наплавки залізничних коліс досягається формуванням у цій зоні змішаної структури бейніту і мартенситу та ізотермічною витримкою за температури між точками початку ( $M_s$ ) і кінця ( $M_f$ ) мартенситного перетворення. Така витримка сприяє зростанню порога втоми зразка з тріщиною – в 1,6 рази, циклічної в'язкості руйнування – в 1,8 рази за практично незмінної міцності, що спричинено падінням в ~ 1,5 рази залишкових напружень II роду в об'ємі рейок бейніту та мартенситу.

## **Практичне значення отриманих результатів**

На підставі проведених досліджень, рекомендовано комплекснолеговану сталь з твердорозчинним ( $Si \sim 1\%$  і марганцем  $\sim 1\%$ ) та дисперсійним ( $[V \square N] \square 104 = 20...25\%$ ) зміщенням за пониженої вмісту вуглецю ( $0,52...0,53\%$ ) для дослідно-промислової перевірки з метою виготовлення залізничних коліс нового покоління.

Обґрунтовано рекомендації для підвищення циклічної тріщиностійкості зони термічного впливу наплавок, які включені в технічний регламент ремонту залізничних коліс, розроблений в Інституті електрозварювання ім. Е.О. Патона НАН України.

На основі отриманих результатів досліджень сформульовано відомчий нормативний документ “Додаткові вимоги до сталей суцільнокатаних високоміцних залізничних коліс”.

Отримані результати досліджень впроваджено в навчальний процес кафедри прикладного матеріалознавства і обробки металів НУ «Львівська політехніка» при підготовці бакалаврів та магістрів за напрямком 132 «Матеріалознавство» та 136 «Металургія».

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

Основні зміст дисертації Кулика В.В. викладено в повному обсязі у 47 наукових працях, з них: 29 статей у фахових наукових виданнях України та інших держав, зокрема 16 статей індексовані наукометричними базами даних Scopus та/або Web of Science; отримано один патент України на винахід та один патент України на корисну модель; 16 праць у матеріалах і тезах доповідей на міжнародних та вітчизняних конференціях. Опубліковані роботи повністю відображають зміст дисертації.

Автореферат дисертації повністю відповідає основним положенням дисертації. Матеріал у роботі викладено логічно, розділи взаємопов'язані і повністю розкривають поставлену в роботі мету.

## **Використання у докторській дисертації результатів, які виносилися на захист кандидатської дисертації**

Наукові положення і результати, які були захищені в кандидатській дисертаційній роботі не використано у докторській дисертації здобувача.

## **Оцінка мови та стилю дисертації. Відповідність дисертації спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство**

Дисертаційна робота викладена професійно, кваліфіковано та грамотно. Матеріали логічно систематизовані та графічно оформлені. За змістом дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство.

### **Зауваження до дисертації та автореферату**

1. Потрібно було б оцінити структурно-фазовий стан і механічні характеристики нових високоміцних сталей не тільки після аустенізації при 950°C, а також при дещо нижчій температурі (850-900°C), що більше відповідає виробничому технологічному режиму.

2. Варто було б оцінити вплив умов гальмування на структуру і властивості комплекснолегованої сталі.

3. В дисертаційній роботі на деяких рисунках (рис. 3.33, 3.39, 3.41, 4.16, 4.54, 5.31), де зображене пошкодженість поверхні кочення коліс відсутнє збільшення, хоча в авторефераті така інформація присутня.

Вказані зауваження не знижують цінності досягнутих результатів і високого наукового рівня дисертаційної роботи Кулика Володимира Володимировича, яка є закінченим науковим дослідженням, виконаним з використанням сучасних методів дослідження.

### **Оцінка змісту дисертації, її завершеність у цілому**

Вважаю, що дисертаційна робота Кулика Володимира Володимировича “Розроблення концепції створення високоміцних колісних сталей” є завершеною науковою роботою, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати, зокрема стосовно вимог до сталей високоміцних

залізничних коліс для одночасного забезпечення високої зносостійкості та опору утворенню дефектів (повзунів і вищербин) на їх поверхні кочення, а також обґрунтування хімічного складу і структурно-фазового стану нових сталей для коліс з підвищеним терміном експлуатації.

Робота відповідає вимогам паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство, а також чинним вимогам п.п. 9, 11, 12 та 13 “Порядку присудження наукових ступенів”, а її автор заслуговує присвоєння йому наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство.

**Офіційний опонент,  
завідувач кафедри матеріалознавства  
та обробки матеріалів  
Державного вищого навчального  
закладу «Придніпровська державна  
академія будівництва та архітектури»  
МОН України,  
доктор технічних наук, професор**



Д.В. Лаухін

Підпис Д.В. Лаухіна затверджую

(гербова печатка)

Учений секретар

