

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

МАКАРОВ ЮРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК [625.03:625.14] (043.5)

**ПОКРАЩЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ ТА ЗАЛІЗНИЧНОЇ
КОЛІЇ В УМОВАХ СКЛАДНОГО ПЛАНУ І ПРОФІЛЮ**

Спеціальність 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів

27 – Транспорт

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2025

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Інституті геотехнічної механіки імені
М.С. Полякова Національної академії наук України

Науковий керівник

кандидат технічних наук,

ГОВОРУХА Володимир Васильович,

Інститут геотехнічної механіки
ім. М.С. Полякова НАН України,
старший науковий співробітник відділу
Геомеханічних основ технологій відкритої
розробки родовищ, м. Дніпро

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор,

ТКАЧЕНКО Віктор Петрович,

Державний університет інфраструктури
та технологій, завідувач кафедри
«Електромеханіка та рухомий склад
залізниць», м. Київ.

кандидат технічних наук, доцент,

ПОТАПОВ Дмитро Олександрович,

Український державний університет
залізничного транспорту, доцент кафедри
«Залізнична колія і транспортні споруди»,
м. Харків.

Захист відбудеться «15» травня 2025 р. о 14 годині 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.06 в Українському державному університеті науки і технологій за адресою: 49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2, ауд. 104.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Українського державного університету науки і технологій або на сайті за посиланням <https://nmetau.edu.ua/ua/mscience/i10/p4782> (Аспірантура і докторантура – Захист у раді Д 08.084.06).

Автореферат розісланий « » квітня 2025 р.

В.о. вченого секретаря
спеціалізованої вченої ради,
д-р техн. наук, професор

Андрій МУХА

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На залізничному транспорті протягом уже більше трьох десятиліть ведуться дискусії щодо можливості вирішення проблеми зменшення показників зносу гребенів коліс і рейок в точці контакту під час руху у криволінійних ділянках колії зі зменшенням показників зносу поверхонь. З часом актуальність цієї проблеми не зменшується, а тільки збільшується, оскільки за останні роки постійно зростає інтенсивність зносу гребенів коліс рухомого складу (вагонів, локомотивів) і рейок, особливо на ділянках зі складними умовами експлуатації.

Колісні пари локомотивів на гірських перевалах проходять обточку кожні 1-2 тижні, а заміна рейок відбувається через кожні 8-10 місяців експлуатації після пропуску 30-35 млн. т бруutto тоннажу. На експлуатаційні розходи, які пов'язані з понаднормативним зносом гребенів коліс рухомого складу та бічних поверхонь рейок, а також на ремонти одиниць рухомого складу та заміну рейок витрачаються великі кошти.

На залізницях України по боковому зносу за дефектами 44.1-2 у 2023 році було вилучено 2357 рейок. Протягом останніх 10 років максимальна кількість рейок, що вилучалась за рік сягала 3400 шт, що у грошовому еквіваленті становить 726 млн 336 тис. грн. Також, на ділянках із складними умовами експлуатації зростає кількість дефектів контактно-втомного походження на поверхні кочення рейок за дефектами по рисунках 10, 11, 17, 18, що у сукупності зі зносом у парі «колесо-рейка» може бути причиною сходу рухомого складу з рейкової колії.

Колісні пари рухомого складу, рейки, деталі стрілочних переводів являються дорогими та масовими елементами, тому подовження їх життєвого циклу суттєво впливає на економічну ефективність всієї залізничної галузі. Таким чином, вирішення проблеми зменшення інтенсивності зносу гребенів колісних пар рухомого складу та рейок, поліпшення динамічних показників взаємодії рухомого складу та рейкової колії, є запорукою безпеки руху у складних умовах плану і профілю залізничної колії і є **важливою актуальною науково-прикладною задачею**, що і вирішується в даній дисертаційній роботі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота містить результати наукових досліджень автора, які виконувались відповідно до плану науково-дослідних робіт у Інституті геотехнічної механіки імені М.С.Полякова Національної академії наук України, за темою «Дослідження міцності та стійкості потенційно небезпечних технічних засобів в криволінійних ділянках рейкового транспорту при розробці родовищ твердих корисних копалин та експлуатації залізниць» (номер державної реєстрації 0119U001349), яка виконувалась за

етапами - у 2019 році «Виявлення та класифікація факторів, що впливають на стійкість та міцність потенційно небезпечних технічних засобів в криволінійних ділянках рейкового транспорту», у 2020 році «Розробка математичних моделей процесів взаємодії скріплення, рейок та коліс ходової частини рухомого складу для визначення параметрів технічних засобів в криволінійних ділянках рейкового транспорту для усунення недоліків в діючих конструкціях». Додатково в дисертаційній роботі використані матеріали науково-дослідної роботи згідно плану філії «Центр діагностики залізничної інфраструктури» АТ «Укрзалізниця», за темою «Ефективність застосування стаціонарних і пересувних лубрикаторів для зменшення зносу рейок та коліс рухомого складу на залізничному транспорті» (номер державної реєстрації 0122U002127). По вказаним роботам автор є виконавцем та автором звітів.

Метою дисертаційної роботи є поліпшення показників динамічної взаємодії рухомого складу та колії і зменшення зносу пари «колесо-рейка» для складних умов експлуатації на залізничному транспорті. Для досягнення поставленої мети у роботі сформульовані та вирішені наступні **задачі дослідження**:

- провести аналіз факторів впливу на знос гребенів коліс та рейок;
- сформулювати визначення складних умов плану і профілю залізничної колії для сучасних умов експлуатації;
- проаналізувати вплив стикових та інших вертикальних і горизонтальних нерівностей колії на характер зносу;
- провести розшифрування геометричних показників просторових нерівностей ланкової колії та колії з довгими рейками по довжині суміжних прямих, перехідних та кругової кривої для математичного моделювання взаємодії рухомого складу та залізничної колії з можливістю визначення зносу пари «колесо-рейка»;
- провести математичне моделювання взаємодії рухомого складу та ланкової колії зі стандартними та довгими рейками;
- провести експериментальні дослідження з визначенням впливу різних факторів на знос коліс та рейок на ділянках із складними умовами експлуатації;
- провести порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень з вибором конструктивних особливостей верхньої будови колії для складних умов плану і профілю залізничної колії та умови використання колійних рейкозмашувачів;
- обґрунтувати параметри довжини рейок та типів скріплення для вкладання у складних умовах плану і профілю залізничної колії для покращення динамічних показників та забезпечення безпеки руху поїздів;
- виконати техніко-економічне обґрунтування запропонованих технічних та технологічних рішень.

Об'єкт дослідження – процес взаємодії рухомого складу і залізничної колії у складних умовах плану і профілю залізничної колії.

Предмет дослідження – знос коліс рухомого складу і рейок у складних умовах плану і профілю залізничної колії при взаємодії рухомого складу і рейкової колії.

Методи дослідження. В роботі використано комплексний підхід до вирішення поставлених задач, який базується на використанні методів аналізу та синтезу, при дослідженнях динамічних якостей показників вантажних вагонів і залізничної колії використано методи математичного та комп'ютерного моделювання, чисельного інтегрування, методах експериментальних досліджень роботи колії та коліс рухомого складу в складних умовах плану і профілю залізничної колії, методах математичної статистики при обробці результатів експериментальних досліджень, методах експертних оцінок при аналізі варіантів зменшення зносу пари «колесо рейка».

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше для умов складного плану і профілю встановлені закономірності показників зносу гребенів коліс і рейок в точці їх контакту під час руху у криволінійних ділянках колії нової конструкції, яка передбачає вкладання довгих рейок по довжині кривої трьома частинами: перша перехідна крива – кругова крива – друга перехідна крива, замість рейок стандартної довжини, що надає змогу скоротити кількість стиків по довжині кривої та зменшити рівень зносу контактуючих поверхонь колеса та рейки.

2. Набули подальшого розвитку критерії, щодо оцінки впливу різноманітних факторів на знос гребенів коліс рухомого складу та рейок у складних умовах плану і профілю залізничної колії, а саме - вплив різноманітних скріплень на дерев'яних та залізобетонних шпалах, підвищення зовнішньої нитки кривої, ваги поїздів, режимів ведення поїздів, стану вагонів, лубрикації, ширини колії і надано рекомендації щодо вибору раціональних параметрів відповідних показників.

3. Отримали подальший розвиток моделі й методи розрахунків взаємодії рухомого складу і колії при застосуванні ланкової колії зі стандартними рейками та колії з довгими рейками. Встановлено значне покращення динамічних показників якості при взаємодії рухомого складу з рейковою колією, показників стійкості і безпеки руху, при використанні довгих рейок на залізничному транспорті в складних умовах експлуатації.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Застосування результатів досліджень дозволяє сприяти скороченню витрат на поточне утримання, ремонт коліс рухомого складу та ремонти колії, зменшити кількість вилучених елементів по критичному зносу гребенів колісних пар та рейок, забезпечувати безпеку руху поїздів.

2. Результати досліджень дисертаційної роботи дозволили запропонувати конструктивні особливості колії у складних умовах плану і профілю залізничної колії у кривих радіусами менше 450 м з застосуванням довгих рейок, що покладено у основу запропонованої конструкції колії для складних умов плану і профілю залізничної колії з рейками типу Р65 довжиною 120 м на щебеневому баласті з рейко-шпальною решіткою на залізобетонних шпалах зі скріпленням типу СКД65-Б або КПП-5-К, які вкладаються по довжині кривої трьома частинами (перша перехідна крива–кругова крива–друга перехідна крива), які з'єднані між собою накладками з шістьма отворами. Вперше обґрунтовано застосування регулюючих типів скріплення на залізобетонних шпалах при радіусах не 450 м і менше, а 650 м і менше з відповідною шириною колії.

3. Одержані в дисертації результати можливо використовувати під час викладання дисциплін «Вагони магістрального та промислового транспорту і контейнери», «Ресурсозберігаючі технології», «Залізнична колія», «Улаштування і експлуатація залізниць», які викладаються студентам денної форми навчання за спеціальністю 273 «Залізничний транспорт», в курсовому і дипломному проектуванні при підготовці відповідних фахівців.

4. Практичне впровадження результатів дисертаційної роботи підтверджено відповідними актами впровадження, наданими в додатках до дисертації.

Особистий внесок здобувача полягає у визначенні і формулюванні мети, ідеї роботи, завдань досліджень і наукових положень, розробці та обґрунтуванні області застосування методів та методик дослідження, обробці та оцінці отриманих результатів, практичній реалізації і впровадженні результатів досліджень. Дисертаційне дослідження виконано особисто автором. Роботи [4, 12, 14] підготовлено без співавторів, а у наукових працях, надрукованих у співавторстві, автору належить наступне: [1] – аналіз залежності величини бічного зносу рейок від пропущеного тоннажу у кривих ділянках колії з різними діапазонами радіусів; [2] – представлені результати комплексних обстежень бокового зносу рейок в різних умовах експлуатації на залізничному транспорті; [3] – аналіз дослідження інтенсивності зносу рейок при використанні різних типів скріплення на дерев'яних та залізобетонних шпалах; [5] – проведено аналіз накопичення залишкових деформацій у стиковій зоні рейкової колії та їх вплив на інтенсивність бокового зносу рейок; [6] – проаналізовано роботу різних конструкцій стаціонарних колійних рейкозмашувачів, що експлуатуються на АТ «Укрзалізниця» та надано пропозиції, щодо сфери застосування конструкції рейкозмашувачів в залежності від умов експлуатації; [7] – представлено експлуатаційні показники пересувних та стаціонарних рейкозмашувачів різних конструкцій; [8] – представлено аналіз сучасних пружних проміжних рейкових скріплень, які застосовуються для регулювання ширини колії на

залізничному транспорті; [9] – розглянуто вплив різноманітних факторів на значення величини зносу рейок; [10] – оброблення натурних показників рейкової колії для проведення математичного моделювання при застосуванні стандартних і довгих рейок; [11] – огляд сучасних проміжних рейкових скріплень; [13] – порівняння економічного ефекту від застосування різних типів проміжних рейкових скріплень на напрямках швидкісного руху поїздів; [15] – надано пропозиції щодо підвищення ресурсу рейкового транспорту за рахунок зниження зносу гребенів коліс, рейок та елементів стрілочних переводів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертації докладалися на: Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу», присвяченій 100-річчю професора Мойсея Абрамовича Фрішмана (м. Дніпропетровськ, 2013 р.); 74-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», (м. Дніпропетровськ, 2014 р.); XV конференції молодих вчених «Геотехнические проблемы разработки месторождений» (м. Дніпро, 2017 р.).

Дисертаційна робота доповідалася в повному обсязі і обговорювалася на засіданні науково-технічної ради філії «Центр діагностики залізничної інфраструктури» АТ «Укрзалізниця» 18 лютого 2022 року. На засіданні наукового семінару відділу Геомеханічних основ технологій відкритої розробки родовищ ІГТМ НАН України 11 червня 2024 року. На засіданні міжкафедрального наукового семінару кафедр «Локомотиви та локомотивне господарство», «Вагони та вагонне господарство», «Транспортна інфраструктура» УДУНТ 5 листопада 2024 року.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано в 15 наукових працях: серед яких 8 статей в фахових наукових журналах [1-8], одна стаття [9] опублікована у науковому виданні, що індексується у міжнародних наукометричних базах даних Google Scholar, Index Copernicus International (ICI), каталог журналів відкритого доступу (DOAJ), 2 додаткові роботи [12, 14], 4 тези доповідей та матеріали конференцій [10, 11, 13, 15], без співавторів опубліковано 3 статті [4, 12, 14].

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків та переліку використаних літературних джерел із 68 найменувань на 9 сторінках; містить 141 сторінок машинописного тексту, в тому числі 38 рисунків, 15 таблиць і 4 додатки на 30 сторінках; загальний обсяг – 172 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі проведено обґрунтування актуальності теми дисертації, сформульовано мета і задачі досліджень, їх зв'язок з науковими темами та програмами. Викладені основні наукові положення і результати, що винесені на захист, наукова новизна, практичне значення отриманих результатів. Наведені відомості про апробацію і публікації матеріалів досліджень.

У першому розділі виконано аналіз основних проблем взаємодії рухомого складу з рейковою колією у кривих ділянках. Проведено аналіз попередніх досліджень факторів впливу на знос гребенів коліс та рейок у кривих ділянках колії.

Особливості взаємодії рухомого складу та колії формують умови контакту колеса та рейки, а знос є результатом такої взаємодії. Вагомий внесок у розвиток досліджень в галузі взаємодії рейкової колії та рухомого складу внесли вчені Лазарян В. А., Фрішман М. А., Коротенко М. Л., Волошко Ю.Д., Рибкін В. В., Даніленко Е.І., Курган М. Б., Говоруха В. В., Бондаренко І. О., Курган Д. М., Данович В. Д., Патласов О. М., Настечик М. П., Арбузов М. А., Потапов Д.О., Губар О. В., Науменко Н.Ю., а також вчені, які займалися розв'язанням цієї проблеми у локомотивному та вагонному господарстві - Блохин Є. П., Боднар Б.Є., Мямлін С. В., Савчук О.М., Босов А. А., Гетьман Г. К., Афанасов А. М., Ткаченко В. П., Ушкалов В. Ф., Радченко М. О., Богомаз Г.І., Маркова О.М., Мокрій Т. Ф., а також зарубіжні вчені А. Вікенс, В. Гарг, Р. Жолі, І. Калкер, В. Кік, О. Креттек, Ф. Картер, Ф. Фредер, У. Дж. Харісс, Дж. Ландарен, Х. Торне, В. Еберсен, І. Зоборі, А. Худзікевич та інші.

Дослідники визначили, що на знос коліс рухомого складу в кривих ділянках колії впливає багато факторів. У всіх проведених дослідженнях приділялася увага зносу по кривій в цілому. А найбільші пошкодження коліс відбуваються в зоні стику рейок. Дослідження в зоні стику рейок, як фактор інтенсивного зносу колісних пар та бокових поверхонь рейок, нажаль не була розглянута вченими детально.

На основі аналізу наукових праць сформульовано визначення складних умов плану і профілю залізничної колії. Встановлено, що в складних умовах плану і профілю залізничної колії одною з основних причин надмірного зносу пари «колесо-рейка» є стик. В зоні стику рейки мають стрибкоподібний боковий знос по зовнішній нитці. При цьому в зоні стиків виникає порушення плавності ходу при русі поїздів, який впливає на знос гребнів та його нерівномірність по всій довжині руху, як у перехідних, так і кругових кривих. Ударна дія при роботі системи «колесо-рейка» у стиковій зоні в декілька разів більше впливає на знос коліс рухомого складу, ніж поза межами стику.

У другому розділі проведено дослідження впливу різноманітних факторів на знос гребенів коліс рухомого складу та рейок у складних умовах плану і профілю залізничної колії, а саме: вплив конструкції колії, вплив підвищення зовнішньої рейки, ширини колії, ваги поїздів, режимів ведення поїздів та стану вагонів, лубрикації коліс та рейок.

Встановлено, що на дерев'яних шпалах на скріпленнях типу ДО і СКД65-Д інтенсивність бічного зносу рейок має менші значення, ніж при скріпленнях СКД65-Б та КПП-5-К на залізобетонних шпалах. Зі зменшенням радіусу інтенсивність бічного зносу рейок зростає. Зі збільшенням ухилу знос збільшується.

Для зменшення фактору інтенсивного зносу рейок у кривих на залізобетонних шпалах запропоновано застосування регулюючих типів скріплення при радіусах не 300 м і менше, а 650 м і менше з відповідною шириною колії.

Встановлено, що зі зменшенням вагових норм інтенсивність бокового зносу рейок зменшується. Після зменшення ваги поїздів з 4600 т до 4200 т інтенсивність бокового зносу рейок у процентному відношенні зменшилась у кривих ділянках колії з радіусом до 300 м, на підйомі на 33,0%, на спуску – на 55,0%, в кривих радіусом 300 м – 350 м, зменшення зносу рейок складо: на підйомі 32,9%, на спуску – 26,3%.

У складних умовах плану і профілю залізничної колії при веденні поїздів дуже важлива синхронність дії машиністів локомотивних бригад на спусках для запобігання накочування вагонів, які слідуєть порожніми, на підйомах підштовхуючих локомотивів для зменшення використання піску головними локомотивами. Стан вагонів повинен мінімізувати вплив наступних факторів – різницю в діаметрах колісної пари, наявність повзунів і гострокінцевого накату, нерівномірного ободу колісної пари по колу його кочення.

Змащення контактуючих поверхонь колеса та рейки зменшує знос. По ступеню впливу на знос гребенів коліс та рейок лубрикація становить 57–73%.

У третьому розділі наведено результати дослідження впливу рейкозмащувачів на зменшення інтенсивності бокового зносу гребенів та рейок, розглянуто системи пересувних та стаціонарних рейкозмащувачів та встановлено, що рейко- та гребнезмащування має позитивний вплив на зменшення інтенсивності бічного зносу та може знижувати знос до 2,5 разів. Для зменшення зносу рейок і гребенів колісних пар та досягнення найбільшого економічного ефекту пов'язаного зі зменшенням експлуатаційних витрат на утримання колійного та вагонного господарства сформовано для систем змащення вимоги. На невеликих станціях, де стрілочна вулиця складається з 5–7 стрілочних переводів, буде економічно необгрунтовано використання вартісних стаціонарних рейкозмащувачів з

програмним забезпеченням. В даних умовах доцільно використовувати плунжерні конструкції рейкозмашувачів. Якщо стрілочна вулиця складається з більшої кількості стрілочних переводів на станціях 1 класу або позакласних станціях, то пропонується встановлювати рейкозмашувачі з програмним забезпеченням. Рейкозмашувальні установки з програмним забезпеченням будуть приносити економічний ефект, якщо ділянки колії на відстані до 3500 м від рейкозмашувача включають криві малого радіусу. В інших випадках пропонується використовувати пересувні рейкозмашувачі на локомотиві або вагон-рейкозмашувач безконтактної дії. Рейкозмашувачі «SKF Lubrication Systems Germany GmbH» окупляться через 1,2 роки, але потребують значних капітальних вкладень, ретельного технічного нагляду та систематичної технічної підтримки.

Пропонується вдосконалити систему змащення гребеня колеса графітовими стержнями, змінивши систему подачі матеріалу. Для цього необхідно змінити кут подачі і ввести «розумну» систему реагування на наявність руху по кривим ділянкам.

У четвертому розділі використана відома математична модель, яка відображає динамічні процеси взаємодії елементів рухомих транспортних засобів та рейкової колії, що дозволяють встановити основні залежності формування екстремальних навантажень при взаємодії в просторовому окресленні колії з різними величинами коефіцієнта тертя між боковими поверхнями гребенів коліс та головок рейок.

Математична модель дослідження динамічних процесів транспортних засобів та рейкової колії криволінійних ділянок довільного креслення, що впливає на знос контактуючих поверхонь гребенів коліс і головок рейок при різних коефіцієнтах тертя між ними, розроблена В. В. Говорухой, на основі наукових досліджень В. А. Лазаряна, В. Ф. Ушкалова, М. О. Радченко, Т. Ф. Мокрій і ін., де у розрахунках математичної моделі використовувались вихідні дані геометричних параметрів просторових нерівностей експериментальних ділянок рейкової колії.

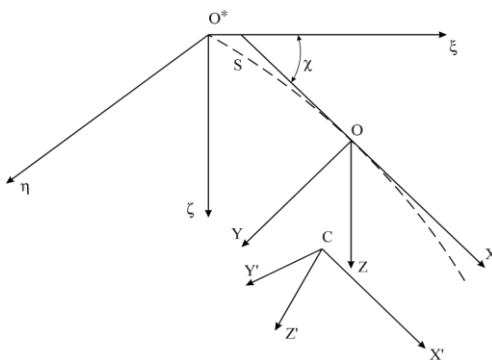


Рис. 1. Системи координат для математичної моделі рухомого транспортного засобу: $O^*\xi\zeta$ – нерухома базова система координат; $OXYZ$ – рухома природна система координат; $CX'Y'Z'$ – зв'язана з тілом рухома система координат; CX' , CY' , CZ' – головні центральні осі інерції твердого тіла; S – шлях, пройдений тілом; χ – кут між осями Ox і $O^*\xi$ в плані.

На рис. 1 показана система координат для математичної моделі рухомого транспортного засобу. На рис. 2 показана розрахункова схема симетричної правої частини загального вигляду системи «вантажний вагон-колія».

Диференціальні рівняння коливань системи «рухомий склад – рейкова колія» складені як рівняння Лагранжа другого роду

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_v} - \frac{\partial T}{\partial q_v} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_v} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_v} = Q_v \quad (v = 1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

де q_v – узагальнені координати; Q_v – відповідні їм узагальнені сили; T і Π – кінетична і потенціальна енергії, Дж; Φ – функція розсіяння енергії, Вт; n – число ступенів вільності системи.

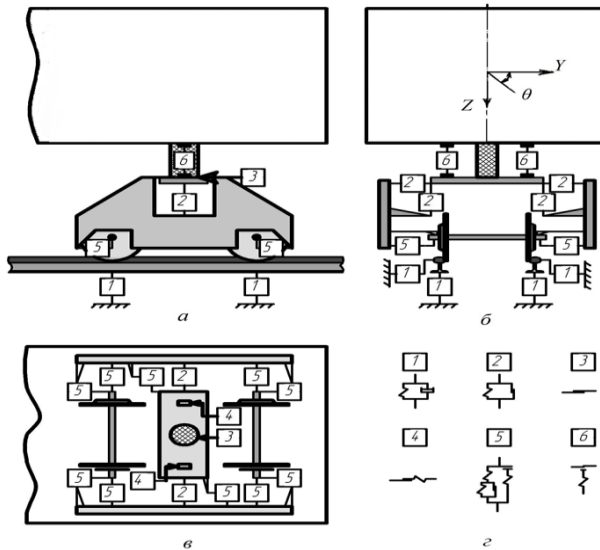


Рис. 2 Розрахункова схема симетричної правої частини загального вигляду системи «вантажний вагон-колія»: а – вид збоку; б – вид з торця; в – вид зверху; г – умовні позначення елементів зв'язку між частинами системи.

Позначення узагальнених координат приведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Позначення узагальнених координат

Елементи розрахункової схеми	Узагальнені координати
Кузов	$x, y, z, \theta, \varphi, \psi$
Надресорні балки	θ_{be}, ψ_{be}
Бічні рами	$y_{fej}, z_{fej}, \varphi_{fej}, \psi_{fej}$
Колісні пари	$x_{sei}, y_{sei}, \psi_{sei}$
Колеса	z_{weij}
Рейки	z_{reij}, y_{reij}

За теорією Кеніга кінетична енергія екіпажу дорівнює сумі енергій всіх складових його твердих тіл. Кінетична енергія кожного твердого тіла розраховується як сума двох складових: енергії T_c поступового руху, яке визначається рухом центру мас,

$$T_c = \frac{1}{2} m (\dot{\xi}^2 + \dot{\eta}^2 + \dot{\zeta}^2) = \frac{1}{2} m \left[(\dot{S} + \dot{x} - y\dot{\chi})^2 + (\dot{y} + x\dot{\chi})^2 + \left(\dot{z} - \frac{1}{2} \dot{h}_R \right)^2 \right], \quad (2)$$

і енергії T_Ω сферичного руху відносно центра мас

$$\begin{aligned} T_\Omega &= \frac{1}{2} (I_x \omega_x^2 + I_y \omega_y^2 + I_z \omega_z^2) = \\ &= \frac{1}{2} I_x (\dot{\theta} + \dot{\theta}_h)^2 + \frac{1}{2} I_y (\dot{\phi} + \dot{\phi}_h)^2 + \frac{1}{2} I_z (\dot{\psi} + \dot{\chi})^2, \end{aligned} \quad (3)$$

де m – маса тіла, т, що розглядається; I_x, I_y, I_z – його головні центральні моменти інерції, $\text{т} \cdot \text{м}^2$; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – кутові швидкості, рад/с пов'язаної з твердим тілом системи координат.

Потенціальна енергія рухомого транспортного засобу (вагона) Π дорівнює сумі енергій пружних деформацій Π_1 і зміненню енергії Π_2 внаслідок підйому або опусканню центрів тяжіння тіл, що входять в систему. Потенціальна енергія Π_1 визначається за теоремою Клапейрона як квадратична функція величин стискування пружних елементів Δ :

$$\Pi_1 = \frac{1}{2} \sum_{\sigma=1}^{n_1} (k_{\sigma z} \Delta_{\sigma z}^2 + k_{\sigma y} \Delta_{\sigma y}^2 + k_{\sigma x} \Delta_{\sigma x}^2 + k_{\sigma \psi} \Delta_{\sigma \psi}^2), \quad (4)$$

де $k_{\sigma z}, k_{\sigma y}, k_{\sigma x}$ – жорсткості σ -го пружного елемента у вертикальному, горизонтальному поперечному і поздовжньому напрямках відповідно, кН/м ; $k_{\sigma \psi}$ – кутова жорсткість в плані σ -го пружного елемента $\text{кН} \cdot \text{м/рад}$; n_1 – кількість пружних елементів у системі; $\Delta_{\sigma z}, \Delta_{\sigma y}, \Delta_{\sigma x}$ – деформації σ -го пружного елемента, м у вертикальному, горизонтальному поперечному і поздовжньому напрямках; $\Delta_{\sigma \psi}$ – кутова деформація елемента в плані, рад.

Потенціал Π_2 визначається з урахуванням підйому або опусканню центрів тяжіння тіл при їх поперечному переміщенні. Для кожного твердого тіла системи

$$\Pi_2 = -mg(z + \theta_h y), \quad (5)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с².

Функція розсіювання енергії Φ рухомого транспортного засобу (вагона) записується у вигляді:

$$\begin{aligned} \Phi = & \frac{1}{2} \sum_{\sigma=1}^{n_2} (\beta_{\sigma z} \dot{\Delta}_{\sigma z}^2 + \beta_{\sigma y} \dot{\Delta}_{\sigma y}^2 + \beta_{\sigma x} \dot{\Delta}_{\sigma x}^2 + \beta_{\sigma \psi} \dot{\Delta}_{\sigma \psi}^2) + \\ & + \sum_{\sigma=1}^{n_3} \left(B_{\sigma z} |\dot{\Delta}_{\sigma z}| + B_{\sigma y} |\dot{\Delta}_{\sigma y}| + B_{\sigma x} |\dot{\Delta}_{\sigma x}| + B_{\sigma \psi} |\dot{\Delta}_{\sigma \psi}| \right), \end{aligned} \quad (6)$$

де β – коефіцієнти розсіювання енергії у демпферах в'язкого тертя, м²/с; B – амплітудні значення сил, кН сухого тертя (n_2, n_3 – кількість демпферів в'язкого і сухого тертя в системі відповідно).

У виразах (4), (6) деякі з коефіцієнтів k, β, B в залежності від конструкції візка, що розглядається, можуть дорівнювати нулю.

Формула для визначення кінетичної енергії колії має вигляд

$$T_r = \frac{1}{2} m_{rz} \sum_{e=1}^2 \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \dot{z}_{reij}^2 + \frac{1}{2} m_{ry} \sum_{e=1}^2 \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \dot{y}_{reij}^2. \quad (7)$$

Потенціальна енергія рейкової колії розраховується таким чином

$$\Pi_r = \frac{1}{2} k_{rz} \sum_{e=1}^2 \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 z_{reij}^2 + \frac{1}{2} k_{ry} \sum_{e=1}^2 \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 y_{reij}^2. \quad (8)$$

Функцію розсіювання енергії в рейковій колії представлено у вигляді:

$$\Phi_r = \frac{1}{2} \beta_{rz} \sum_{e=1}^2 \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \dot{z}_{reij}^2 + \frac{1}{2} \beta_{ry} \sum_{e=1}^2 \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \dot{y}_{reij}^2, \quad (9)$$

де β_{rz}, β_{ry} – коефіцієнти в'язкого опору рейкової колії, приведені до одного колеса.

Для системи «рухомий транспортний засіб – рейкова колія», що розглядається, узагальнені сили Q_v дорівнюють сумі узагальнених сил Q_v^t , що не мають потенціалу, і узагальнених сил Q_v^{ni} , що ураховують неінерціальність введених систем відліку.

Сили Q_v^t дорівнюють складовим дотичних сил взаємодії, що діють на контакті бічних поверхонь реборд коліс та головок рейок при урахуванні можливих фаз контакту.

Сили Q_v^{ni} визначаються за формулою:

$$Q_v^{ni} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_v} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_v} = Q_v^{omi} + Q_v^o + Q_v^\omega + Q_v^{\dot{\omega}} + Q_v^{kop} \quad , \quad (10)$$

де $Q_v^{omi} = f(\ddot{q}_v)$ – узагальнена сила інерції відносного руху;
 $Q_v^o = f(\ddot{S}, \ddot{S}_{\dot{\chi}}, \ddot{h}_R)$ – узагальнена сила інерції поступового переносного руху тіл, що розглядаються, разом з системами відліку $Oxyz$; $Q_v^\omega = f(q_v \dot{\chi}^2)$ – узагальнена відцентрова сила інерції, яка ураховує переносне обертання тіл разом з системами відліку $Oxyz$ довкола точки O ;
 $Q_v^{\dot{\omega}} = f(\ddot{\chi}, q_v, \ddot{\chi}, \ddot{\theta}_h, \ddot{\phi}_h)$ – узагальнена сила інерції, що обертає, яка ураховує непостійність кутової швидкості переносного обертання тіл разом з системами відліку $Oxyz$ довкола точки O перехідної кривої; $Q_v^{kop} = f(\dot{q}_v \dot{\chi})$ – коріолісова узагальнена сила інерції, що ураховує взаємний вплив відносного руху і переносного обертання тіл.

За результатами математичного моделювання було отримано залежності максимальних значень показників зносу коліс і рейок: кут набігання α (рад) колісної пари на зовнішню рейку та один із факторів зносу коліс – потужність сил тертя M_{wear} (Bm) (скалярне множення сил крипу і швидкості коліс відносно рейки) в точці контакту, що приведено на рисунках 3, 4.

На рис. 3 показані результати, отримані для випадку руху вантажного вагона по кривій зі стандартними рейками, на рис. 4 – по кривій з довгими рейками. Як бачимо, показник M_{wear} при укладанні довгих рейок (на відміну від стандартної колії) мало залежить від амплітудних значень стиків і нижчий ніж у випадку використання стандартних рейок на 10–20 % в залежності від швидкості руху вагона. Помітно зменшується і показник α особливо у випадках наявності третього і четвертого варіантів стикових нерівностей.

Переваги використання колії з довгими рейками на круговій кривій свідчить рис. 5, на якому показано залежність показника інтенсивності зносу бічною поверхнею рейки (питомої роботи сил тертя) від пройденого шляху при русі навантаженого вагона по кривій радіуса 275 м з рейками довжиною 120 м та стандартними рейками. Бачимо, у колії зі стиковими нерівностями бічні грані головок рейок зношуються нерівномірно на відміну від колії з довгими рейками, що збільшує термін служби останньої по критерію максимального зносу рейок.

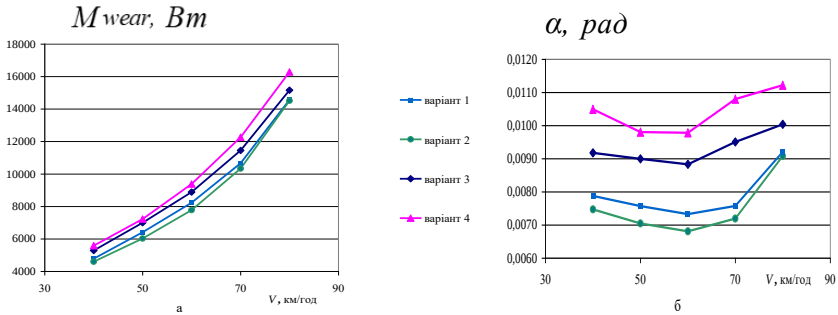


Рис. 4. Залежності максимальних значень факторів зносу коліс і рейок від швидкості руху вагона по кривій радіуса 275 м зі стандартними рейками: а – потужність сил тертя в точках контакту; б – кут набігання колісної пари на зовнішню рейку

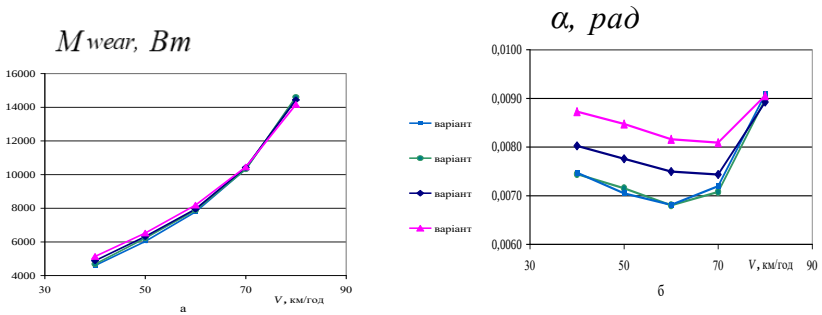


Рис. 5. Залежності максимальних значень факторів зносу коліс і рейок від швидкості руху вагона по кривій радіуса 275 м з довгими рейками: а – потужність сил тертя в точках контакту; б – кут набігання колісної пари на зовнішню рейку

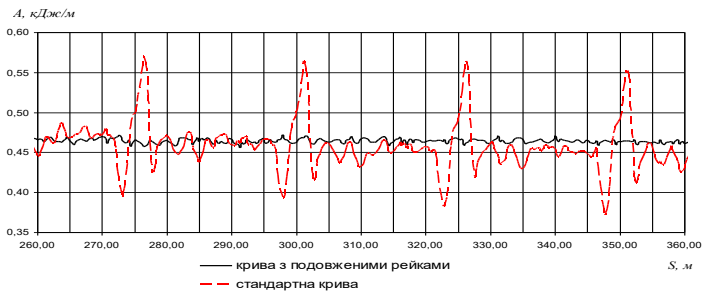


Рис. 6. Залежність показника інтенсивності зносу бічної поверхні рейки (питомої роботи сил тертя) від пройденого шляху при русі навантаженого вагона по кривій радіуса 275 м з довгими та стандартними рейками

За допомогою математичної моделі отримано залежності максимальних значень показників бічних поперечних сил діючих між бічними контактними поверхнями головок рейок і реборд коліс. При цьому кут набігання колісної пари на зовнішню рейку та сили тертя в точці контакту при довгих рейках зменшуються на 10–20% відносно стандартних рейок.

Порівняння результатів математичного моделювання та експериментально-технічні дослідження динамічних процесів взаємодії колеса та рейки в бічній площині, а також формування бокового зносу рейок при динамічній взаємодії коліс рухомого складу та колії у криволінійних ділянках виконувалось в реальних умовах дослідних ділянок колії.

Згідно спостережень, які проводили фахівці ІТМ НАНУ і ДКАУ, було встановлено залежності зносу гребенів коліс від пробігу у складних умовах плану і профілю залізничної колії вантажних вагонів із серійними візками 18-100 зі стандартними колесами, а саме, що при 70 тис. км пробігу вагонів знос коліс сягає значення 5 мм, а після пробігу вагонів 156 тис. км до 40% коліс мають товщину гребенів 26 мм та менше. Враховуючи висновки математичного моделювання можна стверджувати що, використання довгих рейок буде позитивно впливати на інтенсивність зносу коліс, зменшувати кількість їх переточок та подовжувати ресурс колісних пар.

Аналізуючи знос колісних пар локомотивів за даними по ТЧ-9 Мукачєво, які були оброблені фахівцями ЦОМ (Департамент оперативного моніторингу АТ «Укрзалізниця») встановлено, що вартість ремонту колісної пари з заміною бандажу складає 200,6 тис. грн. З розрахунку на експлуатаційний парк електровозів ВЛ11 регіональної філії «Львівська залізниця» 62 од. для проведення ремонту колісних пар (з зміною бандажу) на рік при збільшенні ресурсу на 10-20% дозволить заощадити 120 млн. грн. Також при зменшенні кількості проведення ТО-4 та потреби планової заміни бандажів колісних пар у зв'язку з збільшенням ресурсу бандажу, з урахуванням 10-20% (з 91 тис. км до 100,1 – 109,2 тис. км.) збільшення ресурсу можливо додатково збільшити доходи від експлуатації за рік на один локомотив на суму:

- робота у вантажному русі: 248 948,1 грн.;
- робота у передаточно-вивізному русі: 128 247,4 грн.;
- робота у підштовхуванні: 209 995,9 грн.;
- господарська робота: 152 198,5 грн.

Обсяг економії коштів від зменшення простою електровозів на ремонті колісних пар (заміна бандажів, без урахування ТО-4) при зниженні інтенсивності зносу гребенів колісних пар на 10-20% по парку ВЛ11 за рік складе від 234 183,3 – 468 367,3 грн.

При порівнянні результатів математичного моделювання і експериментальних даних встановлена взаємна однозначність відповідності

між розглянутою рейковою колією, як об'єктом, та побудованою математичною моделлю при кількісному оцінюванні певних параметрів на основі порівняння з об'єктивними експериментальними даними, одержаними в реальних умовах експлуатації. При цьому по основному показнику оцінювання, а саме зносу бокової поверхні рейок від дії гребенів коліс, при математичному моделюванні за допомогою створеної математичної моделі механічних процесів системи одержано, що зменшення значень коефіцієнтів тертя від 0,25 до 0,05 приводить до зниження показників зносу бічної поверхні відповідно у 3,5-4,5 рази, а по результатам експериментальних досліджень з конкретними рейко-змащувальними установками та модифікаторами встановлено зменшення зносу головок рейок в середньому в 1,89 рази. Інтенсивність зносу без застосування лубрикації складала 0,189-0,207 мм/млн т брутто, а після обробки рейок модифікаторами інтенсивність зносу головок рейок зменшилась до 0,090-0,122 мм/млн т брутто пропущеного вантажу. Це підтверджує адекватність створених математичних моделей функціонування технічних засобів конкретному об'єкту досліджень транспортної системи в криволінійних ділянках залізничної колії.

У н'ятому розділі для мінімізації впливу стиків на гребені коліс та суттєве зменшення їх зносу проведено обґрунтування використання рейок довжиною 120 м в складних умовах плану і профілю залізничної колії, проведено аналіз та обґрунтування рейкових скріплень, проведена оцінка роботи запропонованої конструкції колії.

З проведених розрахунків встановлено, що для умов температурних амплітуд України рейки довжиною від 43 м до 130 м необхідно вважати довгими рейками, що дає можливість експлуатувати довгі рейки у складних умовах плану і профілю залізничної колії, і дозволяє зменшити динамічний вплив, знос гребенів і відповідно витрати, які пов'язані з відновленням профілю коліс.

Для мінімізації зносу гребенів коліс в складних умовах плану і профілю залізничної колії запропонована конструкція колії на щебеневому баласті з рейко-шпальною решіткою на залізобетонних шпалах з рейками типу Р65 довжиною 120 м, які вкладаються по довжині кривої трьома частинами (перша перехідна крива–кругова крива–друга перехідна криві), які з'єднані між собою накладками з шістьма отворами на скріпленні типу СКД65-Б та КПП-5-К та проведені розрахунки стикового та поздовжнього опору рейки на обраних типах скріплень з накладками з шістьма отворами. Проведені розрахунки дають можливість стверджувати, що обрана конструкція має достатній запас міцності та стійкості та відповідає нормам улаштування залізничної колії.

Використання довгих рейок довжиною 120 м має однозначний позитивний економічний ефект з самого початку улаштування відповідної конструкції колії, що перевищує ефект навіть від лубрикації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертації сформульована і вирішена важлива науково-технічна задача поліпшення взаємодії рухомого складу з рейковою колією у складних умовах плану і профілю залізничної колії зі зменшенням показників зносу гребенів коліс і рейок в точці контакту, який досягається за рахунок вкладання довгих рейок по довжині кривої трьома частинами: перша перехідна крива – кругова крива – друга перехідна крива. На підставі проведених досліджень зроблені наступні висновки:

1. Встановлено, що в зоні стику гребені коліс та рейки мають стрибкоподібний боковий знос по зовнішній нитці. У кривих ділянках в стиках ланкової колії знос гребенів та рейок більш інтенсивний та нерівномірний по довжині рейок як в перехідних так і в кругових ділянках, ніж в позастиковій зоні. Тому в кривих ділянках колії в складних умовах плану і профілю залізничної колії необхідно зменшити кількість стиків.

2. Визначено ключові характеристики складних умов плану і профілю залізничної колії, а саме: радіуси, ухили, та труднощі переобладнання, які пов'язані зі значними фінансовими витратами.

3. Для вирішення проблеми стабілізації стійкого руху рухомого складу в перехідній та круговій кривих та зменшення бокового навантаження на гребені коліс та колію, пов'язаних з зоною стику досягається за рахунок вкладання рейок довжиною 120 м. Встановлено, що для умов температурних амплітуд України рейки довжиною від 43 м до 130 м є довгими рейками.

4. Проведено розшифрування геометричних показників просторових нерівностей ланкової колії та колії з довгими рейками для математичного моделювання взаємодії рухомого складу та ланкової колії зі стандартними та довгими рейками. В результаті отримано залежності максимальних значень показників бічних поперечних сил діючих між бічними контактними поверхнями головок рейок і реборд коліс. При цьому кут набігання колісної пари на зовнішню рейку та сили тертя в точці контакту при довгих рейках зменшуються на 10–20% відносно стандартних рейок.

5. При аналізі додаткових факторів встановлено, що для зменшення фактору приробки у кривих та відповідного зносу колеса і рейки, на залізобетонних шпалах необхідно використовувати регулюючі типи скріплень починаючи не з 300 м, а з 650 м. У кривих ділянках колії на залізобетонних шпалах влаштовувати початкову ширину колії згідно радіусу кривої:

при радіусах від 650 м до 450 м – 1530 мм;

при радіусах від 450 м і менше – 1535 мм.

6. При порівнянні результатів математичного моделювання і експериментальних даних встановлено збіг з об'єктивними експериментальними даними, одержаними в реальних умовах експлуатації, а

саме, при математичному моделюванні за допомогою створеної математичної моделі механічних процесів системи одержано, що зменшення значень коефіцієнтів тертя від 0,25 до 0,05 приводить до зниження показників зносу бічної поверхні відповідно у 3,5-4,5 рази, а по результатам експериментальних досліджень з конкретними рейко-змащувальними установками та модифікаторами встановлено зменшення зносу головок рейок в середньому в 1,89 рази.

7. Запропонована конструкція колії для складних умов плану і профілю залізничної колії на щебеневому баласті з рейко-шпальною решіткою на залізобетонних шпалах з рейками типу Р65 довжиною 120 м, які вкладаються по довжині трьома частинами (перша перехідна крива–кругова крива–друга перехідна крива), які з'єднані між собою накладками з шістьма отворами, на скріпленні типу СКД65-Б та КПП-5-К, має однозначний позитивний з самого початку улаштування відповідної конструкції колії, що перевищує економічний ефект навіть від лубрикації. Проведені розрахунки дають можливість стверджувати, що обрана конструкція має достатній запас міцності та стійкості та відповідає нормам улаштування залізничної колії.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях:

1. Рибкін В.В., Настечик М.П., Арбузов М.А., Каленик К.Л., **Макаров Ю.О.**, Маркуль Р.В. / Дослідження впливу параметрів улаштування колії на інтенсивність бічного зношення головки рейки в кривих ділянках // Збірник наукових праць ДонІЗТ, 2013. – № 34. –С. – 155 – 162. – ISSN: 1993-5579 – *(Особисто здобувачем: проведено аналіз залежності величини бічного зносу рейок від пропущеного тоннажу у кривих ділянках колії з різними діапазонами радіусів)*
2. Говоруха В.В., **Макаров Ю.А.** / Исследования бокового износа рельсов при механическом взаимодействии пути и колес ходовой части вагонов на криволинейных участках пути // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепр, 2017. – № 134. – С. 125 – 140. – ISSN: 2309-6004 – *(Особисто здобувачем: представлені результати комплексних обстежень зносу рейок при взаємодії рухомого складу та залізничної колії в різних умовах експлуатації)*
3. Говоруха В.В., **Макаров Ю.А.**, Семидетная Л.П. / Повышение износостойкости и устойчивости пути криволинейных участков малых радиусов // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепр, 2018. – № 142. – С. 103–114. – ISSN: 1607-4556 – ISSN: 2309-6004 –DOI: 10.15407/geotm2018.142.103 – *(Особисто здобувачем: проведено дослідження впливу різних типів скріплення на*

дерев'яних та залізобетонних шпалах на інтенсивність зносу у парі «колесо-рейка»)

4. **Макаров Ю.О.** / Проблеми наднормотивного бокового зносу рейок на ділянках зі складними умовами експлуатації // «Залізничний транспорт України», 2019. – № 3. – С. – 39 – 45. – ISSN: 2311-4061 – DOI: 10.34029/2311-4061-2019-132-3-39-45 – (Google Scholar)
5. Говоруха В.В., **Макаров Ю.А.**, Кизилов В.К., Собко Т.П., Семидетная Л.П. / Исследование бокового износа головки рельса на криволинейных участках пути с особо малыми радиусами кривизны // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепр, 2019. – № 149, – С. 111–121. – ISSN: 1607-4556 – ISSN: 2309-6004 – DOI: 10.15407/geotm2019.149.111 – (Google Scholar) – (*Особисто здобувачем*: проведено аналіз накопичення залишкових деформацій у стиковій зоні рейкової колії та їх вплив на інтенсивність бокового зносу рейок)
6. Демченко С.М., **Макаров Ю.О.**, Татуревич А.А. / Проблеми застосування стаціонарних рейкозмашувальних пристроїв на залізницях АТ «Укрзалізниця» // «Залізничний транспорт України», 2020. – № 1. – С. – 25 – 34. – ISSN: 2311-4061 – DOI: 10.34029/2311-4061-2020-134-1-25-34 – (Google Scholar) – (*Особисто здобувачем*: проаналізовано роботу різних конструкцій стаціонарних колійних рейкозмашувачів, що експлуатуються на АТ «Укрзалізниця» та надано пропозиції, щодо сфери застосування конструкції рейкозмашувачів в залежності від умов експлуатації)
7. Мямлін С.В., **Макаров Ю.О.**, Залеський Р.Ю. / Зменшення зносу пари "колесо-рейка" шляхом удосконалення технології лубрикації // Залізничний транспорт України. – 2022. – № 4. – С. 27 – 38. – ISSN: 2311-4061 – DOI: 10.34029/2311-4061-2022-145-4-27-38 – (Google Scholar) – (*Особисто здобувачем*: представлено експлуатаційні показники пересувних та стаціонарних рейкозмашувачів різних конструкцій)
8. Демченко С.М., **Макаров Ю.О.**, Татуревич А.А. / Вплив різних типів проміжних рейкових скріплень на інтенсивність зношування рейок на криволінійних ділянках колії // «Залізничний транспорт України», 2023. – № 1. – С. 27 – 33. – ISSN: 2311-4061 – DOI: 10.34029/2311-4061-2023-146-1-27-33 – (Google Scholar) – (*Особисто здобувачем*: представлено аналіз сучасних пружних проміжних рейкових скріплень, які застосовуються для регулювання ширини колії та запропоновано раціональні сфери норм утримання ширини колії для зменшення зносу у контактуючій парі «колесо-рейка»)
9. **Makarov, Y.**, Zaleskyi, R., & Mykhalichenko, M. / Influence of different factors on the value of the rail wear rate // Acta Technica Jaurinensis, 2024.

– 17(1), 45 – 58. – DOI: [10.14513/actatechjaur.00735](https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00735) (Scopus, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus) – (*Особисто здобувачем*: розглянуто вплив різноманітних факторів на значення величини зносу коліс рухомого складу та рейок та надано рекомендації щодо зменшення зносу)

Додаткові праці:

10. Hovorukha V., Hovorukha A., **Makarov Y.** / Research on the dynamic processes of vehicles and an arbitrary configuration rail track, influencing the side wear of the rail head and wheel flange contact surfaces at different values of friction coefficient between them // Ser.: Earth and Environmental Science – C. 01 – 19. – ISSN: [1755-1307](https://doi.org/10.1088/1755-1307) – ISSN: [1755-1315](https://doi.org/10.1088/1755-1315) – DOI: [10.1088/1755-1315/970/1/012029](https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012029) – (*Особисто здобувачем*: проведено оброблення натурних показників рейкової колії для проведення математичного моделювання при застосуванні стандартних і довгих рейок, аналіз результатів математичного моделювання)
11. Клочко Б.Г., **Макаров Ю.О.** / Застосування нових конструкцій верхньої будови колії на напрямках швидкісного руху поїздів // Проблеми взаємодії колії та рухомого складу: праці Міжнародної науково-практичної конференції, яка присвячена 100-річчю професора Мойсея Абрамовича Фрішмана, 19–20.09.2013. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2013. – с. 85 – 86. – УДК 625.03 – (*Особисто здобувачем*: проведено огляд сучасних проміжних рейкових скріплень, які застосовують на коліях АТ «Укрзалізниця»)
12. **Макаров Ю.О.** / Безопасность движения поездов – ключевая задача обеспечения перевозочного процесса // «Українські залізниці», 2014. – №7 (13). – с. 52 – 55.
13. **Макаров Ю.О.**, Гусак М.А., Панченко І.В. / Застосування нових конструкцій верхньої будови колії на напрямках швидкісного руху поїздів // Тези доповідей на 74 Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 15 – 16.05.2014 – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2014. – 267–268 с. – УДК 656.2 – (*Особисто здобувачем*: проведено порівняння економічного ефекту від застосування різних типів проміжних рейкових скріплень на напрямках швидкісного руху поїздів)
14. **Макаров Ю.О.** / Восстановление наплавкой как эффективный метод продления жизненного цикла и повышения износостойкости элементов стрелочных переводов // «Українські залізниці», 2019. – №7 (73), – с. 7 – 11.
15. Говоруха В.В., **Макаров Ю.А.** / Повышение ресурса работы рельсового транспорта за счет уменьшения интенсивности бокового износа рельсов в кривых малых радиусов и стрелочных переводах //

Сучасні технології розробки рудних родовищ. Екологоекономічні наслідки діяльності підприємств ГМК.36: IV Міжнародна науково-технічна конференція: 24 листопада 2017 р. – Кривий Ріг, 2017. – С. 63 – 64. – *(Особисто здобувачем: надано пропозиції щодо підвищення ресурсу рухомого складу та залізничної колії за рахунок зниження зносу гребенів коліс, рейок та елементів стрілочних переводів).*

АНОТАЦІЯ

Макаров Ю. О. Покращення взаємодії рухомого складу та залізничної колії в умовах складного плану і профілю. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів. – Інститут геотехнічної механіки імені М.С. Полякова Національної академії наук України; Український державний університет науки і технологій, Дніпро, 2025.

Дисертація присвячена вирішенню питання поліпшення взаємодії рухомого складу з рейковою колією у складних умовах плану і профілю залізничної колії та зменшенню зносу рейок та коліс рухомого складу, що досягається за рахунок вкладання довгих рейок по довжині кривої трьома частинами: перша перехідна крива – кругова крива – друга перехідна крива. Запропонована конструкція колії для складних умов плану і профілю залізничної колії.

В першому розділі виконано аналіз основних проблем взаємодії рейкової колії та рухомого складу у кривих ділянках колії. Наведено основні причини інтенсивного зношування бічної грані рейок та гребенів коліс. Проведено аналіз попередніх досліджень факторів впливу на знос гребенів коліс та рейок у кривих ділянках колії. Сформульоване визначення складних умов плану і профілю залізничної колії. Окремо розглянуто вплив стику на розлади колії і знос у парі «колесо-рейка».

В другому розділі проведено дослідження впливу різноманітних факторів на знос гребенів коліс та рейок у складних умовах плану і профілю залізничної колії, а саме - вплив різноманітних скріплень на дерев'яних та залізобетонних шпалах, підвищення зовнішньої нитки кривої, ваги поїздів, режимів ведення поїздів, стану вагонів, лубрикації, ширини колії, і дано рекомендації щодо вибору раціональних параметрів відповідних показників.

У третьому розділі проаналізовано роботу систем пересувних та стаціонарних рейкозмашувачів. А також, представлені результати експериментальних досліджень різних конструкцій змащування. При цьому інтенсивність зносу поверхонь гребенів коліс та головок рейок при змащуванні пересувними рейкозмашувачами на базі локомотива ВЛ11М знижена у 2,17 – 2,33 разів, при застосуванні рейкозмашувачів плунжерного типу знижено у

1,04 - 1,33 раз. Проведено економічні розрахунки ефективності впровадження рейко- гребне- змащувальних установок з програмним забезпеченням та терміни окупності. Надано пропозиції, щодо вибору конструкції рейко- та гребне- змащувачів в залежності від експлуатаційних умов.

В четвертому розділі використана математична модель і наведені результати математичного моделювання динамічних процесів взаємодії рухомого складу і рейкової колії в умовах малих радіусів кривизни з стандартними і довгими рейками 120 м. Встановлено залежності максимальних значень показників зносу бічних поверхонь головок рейок і реборд коліс в випадках руху у кривих із стандартними рейками та рейками довжиною 120 м при різних швидкостях руху. При цьому ці показники зносу при довгих рейках зменшуються на 10-20 % відносно стандартних рейок.

У п'ятому розділі викладено результати експериментальних досліджень в експлуатаційних умовах зі стандартними рейками (25 м) та результати теоретичних досліджень інтенсивності зносу бічних поверхонь гребенів коліс та головок рейок, при русі вантажного вагона по довжині криволінійної ділянки з довгими рейками (120 м). Проведено аналіз вимог до конструкції залізничної колії в складних умовах плану і профілю та її відповідність умовам стійкості і міцності.

Запропонована конструкція колії для складних умов на щебеневому баласті з рейко-шпальною решіткою на залізобетонних шпалах з рейками типу Р65, UIC60, Р50 довжиною 120 м, які вкладаються по довжині трьома частинами перша перехідна крива – кругова крива – друга перехідна крива, які з'єднані між собою накладками з шістьма отворами на скріпленнях з регулюванням ширини колії та проведені розрахунки стикового та повздовжнього опору рейки на обраних типах скріплень з накладками з шістьма отворами. Отримані значення дають можливість стверджувати, що обрана конструкція має достатній запас міцності і стійкості та відповідає нормам улаштування залізничної колії.

Ключові слова: знос бокової поверхні гребенів коліс і головок рейок, ресурс роботи, план і профіль колії, з діапазоном радіусів від 200 м до 450 м, довгі і стандартні рейки.

ABSTRACT

Makarov, Yu.O. Improving the interaction of rolling stock and railway track in conditions of a complex plan and profile. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the Candidate of Technical Sciences degree in the specialty 05.22.07 – Rolling stock of railways and traction of trains. – N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine; Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, 2025.

The dissertation is devoted to solving the issue of improving the interaction of the rolling stock with the rail track in the complex conditions of the plan and profile of the railway track and reducing the wear of the rails and wheels of the rolling stock, which is achieved due to the laying of long rails along the length of the curve in three parts: the first transitional curve - circular curve - the second transitional curve. The proposed track design for complex conditions of the plan and profile of the railway track.

In the first section, we analyze the main problems of interaction of rolling stock with rail tracks in curved sections of track. The main reasons for intensive wear of the side face of rails and wheel ridges are given. We consider the influence of the track design features in difficult operating conditions on wear in the rail-wheel pair. Previous studies of factors affecting the wear of rails and wheel ridges in curved sections of the track are analyzed. We define complex operating conditions. The effect of the joint on track disorders is considered separately.

In the second section, we study the influence of various factors on the wear of rails and wheel ridges of rolling stock in difficult operating conditions, namely, the influence of various fasteners on wooden and reinforced concrete sleepers, track width, increase in the outer thread of the curve, train weight, wheel and rail hardness, train driving modes, condition of cars and recommendations for choosing the optimal parameters of the corresponding indicators.

We analyze the wear resistance of the rail at the initial stage of "fitting" the rail track and rolling stock to the moment of optimal position of the "rail" and "wheel" track width and reducing the intensity of lateral wear by reducing the weight of trains.

The work of rail fasteners of the SKD65-B (СКД65-Б) and KPP5-K (КПП-5-К) types on reinforced concrete sleepers with track width adjustment up to 1,535 mm and proposals for the rail track design in difficult operating conditions are analyzed. Rail-sleeper grid with fasteners on reinforced concrete sleepers with smooth expansion removal in transition curves and stable track width in circular curves and rails that are laid on the length of transition and circular curves.

In the third section, the operation of mobile and stationary rail lubrication systems is analyzed. The results of experimental studies of various lubrication designs are also presented. At the same time, the intensity of lateral wear of the lateral surfaces of the wheel crests and rail heads when lubricated by mobile rail greasers based on the VL11M locomotive is reduced by 2.17-2.33 times. Indicators of the intensity of lateral wear of rails and lateral surfaces of wheel ridges when using plunger-type rail greasers are reduced by 1.04 - 1.33 times.

In the fourth chapter, a well-known mathematical model is used and the results of mathematical modeling of the dynamic processes of the interaction of rail vehicles and the rail track in the spatial state of oscillations of the transport system are given, the mechanical indicators between their components are revealed, and the powers of friction forces at points are determined of mutual contact between the side

surfaces of the rail heads and the rim of the wheels at different coefficients of friction between them in conditions of small radii of curvature with standard and long rails of 120 m.

The dependences of maximum values of wear indicators of the side surfaces of wheel heads and rail edges, such as the angle of the wheelset run on the outer rail of a curved track and the power of friction forces at the contact point in cases of curves with standard butt rails and rails 120 m long at speeds, are established. At the same time, these wear indicators for extended rails are reduced by 10-20% relative to standard (butt) rails.

Chapter 5 presents the results of experimental studies under operating conditions with standard rails (25 m) and the results of theoretical studies of the wear intensity of the lateral surfaces of wheel crests and rail heads when a freight car moves along the length of a curved section with long rails (120 m). The requirements for the design of the railroad track in difficult conditions of plan and profile and its compliance with the conditions of stability and strength are analyzed.

The proposed track design for difficult conditions on crushed stone ballast with a rail-sleeper grid on reinforced concrete sleepers with rails of P65, UIC60, P50 type 120 m long, which are laid in length in three parts: the first transition (circular), the second transition (curves connected by overlays with six holes on fasteners of SKD65-B (СКД65-Б) and KPP5-K (КПП5-К) types), and calculations of the butt and longitudinal resistance of the rail on selected types of fasteners with overlays with six holes. The obtained values allow us to state that the selected structure has a sufficient margin of safety and stability and meets the standards of the railway track design.

Key words: wear of the side surface of wheel ridges and rail heads, service life, track plan and profile, with a range of radii from 200 m to 450 m, long and standard rails.

МАКАРОВ ЮРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПОКРАЩЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ ТА
ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ В УМОВАХ СКЛАДНОГО ПЛАНУ І ПРОФІЛЮ**

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Формат 60x84/16
Ум. друк. арк. 0,9. Обл. – вид. арк. 1,0. Тираж 100 прим.

Видавництво Українського державного університету
науки і технологій
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.03

вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010