

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ЕКОНОМІКО - ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ТРАНСПОРТУ

Йосифович Роман Миколайович

УДК 625.033.37:625.42

НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ І ПРАКТИЧНЕ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ
ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО РЕСУРСУ РЕЙОК КИЇВСЬКОГО
МЕТРОПОЛІТЕНУ

Спеціальність 05.22.06-залізнична колія

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ -2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі «Залізнична колія та колійне господарство» Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Даніленко Едуард Іванович, Державний економіко-технологічний університет транспорту, завідувач кафедри залізничної колії та колійного господарства

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Даренський Олександр Миколайович, Український державний університет залізничного транспорту, завідувач кафедри колії та колійного господарства

кандидат технічних наук, доцент
Баль Олена Миронівна,
завідувач кафедри «Рухомий склад і колія» Львівської філії Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Захист відбудеться «22» березня 2016 року о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.820.01 в Державному економіко-технологічному університеті транспорту за адресою: 03049, м. Київ, вул. М. Лукашевича, 19, ауд. №115.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного економіко-технологічного університету транспорту за адресою: 03049, м. Київ, вул. М. Лукашевича, 19

Автореферат розісланий «16» лютого 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради К 26.820.01,
к.т.н., доц.

Твердомед В.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Умови експлуатації рейкових колій метрополітенів суттєво відрізняються від умов експлуатації магістральних залізниць. Це стосується навантаження на осі рухомого складу, інтенсивності руху поїздів, швидкостей руху та іншого. Терміни служби рейок і стрілочних переводів на метрополітені також суттєво відрізняються від магістральних колій. Тобто, відомі і достатньо обґрунтовані на магістральних коліях нормативи для строків служби, а також нормативи для вибракування рейок по дефектах, не правомірно застосовувати для колій метрополітенів з причин суттєвої відмінності експлуатаційних умов.

Існуючі на теперішній час нормативи термінів служби рейок за зносом і дефектності колій Київського метрополітену були розроблені більш ніж 15 років тому, в 2001 році, на основі нормативів магістральних залізниць. Ці нормативи не враховували, в достатній мірі, особливості експлуатації на метрополітені.

Так, вилучення з експлуатації дефектних рейок здійснюється у відповідності до існуючих нормативів, що застосовуються на магістральному транспорті. В тому числі, вилучення дефектних рейок з причин появи на поверхні головки рейок дефектів контактено-втомного виду коду 11.1-11.2 здійснюється відразу ж після появи дефектів розмірів по глибині 2,5-4,0 мм і по довжині більше 25 мм, що може відбуватися в багатьох випадках вже після декількох місяців експлуатації. А це дуже стримує загальні експлуатаційні терміни служби рейок в метрополітені.

Тому, наукове обґрунтування і розробка практичних заходів підвищення нормативних строків служби рейок для умов Київського метрополітену, з визначенням залишкового ресурсу їх експлуатації, після появи на поверхні кочення головки дефектів контактено-втомного виду, являється актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації пов'язана з планами виконання науково-дослідних робіт кафедри "Залізнична колія та колійне господарство" Державного економіко-технологічного університету транспорту, які виконувались за завданнями Головного управління колійного господарства Укрзалізниці і Київського метрополітену, і в яких автор дисертації брав участь як співвиконавець.

Безпосередньо автор брав участь в наступних науково-дослідних роботах: "Наукове обґрунтування та розробка раціональних типів і конструкцій верхньої будови колії для нових умов експлуатацій і швидкісного руху поїздів на залізницях України", тема № 16-2010 Б-ЦТех, Київ, ДЕТУТ, 2010-2012 р.р.; "Розробка інструкції з улаштування та утримання колії залізниць України", тема №204/2011-ЦЮ, Київ, ДЕТУТ, 2011р.; "Розробка технічних умов на експлуатацію рейок і стрілочних переводів на коліях Київського метрополітену", тема № 55-П-13, Київ, ДЕТУТ, 2013-2015 рр., а також автор брав участь у розробці наступних нормативно-технічних документів для галузі Укрзалізниці "Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України" ЦП/0269 (наказ УЗ № 072-Ц від 01.03.2012 р.); "Технічні умови на експлуатацію рейок у коліях Київського метрополітену" (наказ КП Київського метрополітену №125-Н від 23.03.2015 р.); "Технічні умови на експлуатацію стрілочних переводів на коліях Київського метрополітену" (наказ КП Київського метрополітену №169-Н від 29.04.2015р.). Автор також брав участь, як

співвиконавець, в розробці навчального посібника, що виконувався за планом ДЕТУТ, "Неруйнівний контроль і дефектоскопія рейок" (план ДЕТУТ, 2014-2015 рр.).

Тема дисертації відповідає загальній програмі вдосконалення системи експлуатації колійного господарства Київського метрополітену.

Мета і завдання досліджень. Метою даної дисертаційної роботи є вирішення наукової задачі підвищення експлуатаційного ресурсу рейок на коліях Київського метрополітену. У відповідності із зазначеною метою в дисертації поставлені і вирішені наступні задачі:

1. Проаналізовано технічні характеристики конструкцій залізничних колій і умови експлуатації на усіх 3-х лініях Київського метрополітену.

2. Виконані статистичні дослідження вилучення дефектних рейок із експлуатуємих колій в залежності від умов експлуатації.

3. Виконані теоретичні дослідження довговічності рейок в зоні контактної взаємодії з колесами з позицій напружено-деформованого стану металу.

4. Проведені стендові експериментальні випробування дослідних зразків дефектних рейок, вилучених з експлуатації, на багатоциклову витривалість з метою визначення їх залишкового ресурсу, а також на злам при дії граничного вертикального навантаження.

5. Проведено періодичний дефектоскопний контроль появи і розвитку дефектів в головці і підшві рейки в процесі випробувань дослідних зразків рейок на багатоциклову витривалість.

6. Розроблено нові технічні умови на експлуатацію рейок Київського метрополітену типів Р50 і Р65, з визначенням підвищених, в порівнянні з існуючими, нормативних строків їх служби для різних умов експлуатації.

7. Надана оцінка техніко-економічної ефективності впровадження розроблених заходів.

Об'єкт дослідження – ресурс експлуатаційної роботи рейок на коліях метрополітену, залишковий ресурс експлуатації рейок з контактно- втомними дефектами.

Предмет дослідження - рейки залізничних колій метрополітену.

Методи досліджень. В роботі використано комплексний метод досліджень, який включає теоретичну і експериментальну частину. Для теоретичних розрахунків застосовувалась теорія контактної взаємодії коліс рухомого складу з рейками залізничної колії, в якій розглядалися як класичні методи розрахунків теорії пружності, так і сучасний чисельний метод розв'язання *крайових* задач математичної фізики – метод кінцевих елементів (МКЕ). Експериментальні методи включають випробування на лабораторних стендах дослідних зразків дефектних рейок на багатоциклову витривалість. Для обробки статистичних даних, отриманих з багаторічних спостережень за вилученням дефектних рейок, використовувались методи математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів:

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше для залізничних колій метрополітенів в Україні (на прикладі Київського метрополітену) виконано комплексне наукове і практичне вирішення

проблеми підвищення експлуатаційного ресурсу рейок шляхом додаткового використання залишкового ресурсу рейок з дефектами контактної-втомного походження на поверхні кочення голівки.

2. Теоретичними розрахунками, з використанням різних розрахункових методик, в тому числі класичної методики розрахунків теорії пружності і сучасної методики математичної фізики – метода кінцевих елементів (МКЕ), визначено напружено-деформований стан рейок типу Р50 в зоні контактної взаємодії колеса і рейки на поверхні кочення головки для експлуатаційних умов Київського метрополітену.

3. Вперше в Україні теоретичними розрахунками обгрунтовано велику вірогідність утворення дефектів контактної-втомного походження в вигляді викришування і вищерблювання металу на поверхні кочення рейки, біля краю головки, в результаті утворення високого ступеню напруженого нерівномірного стиску в цій зоні при одночасній появі високих значень нормальних напружень на поверхні кочення і великих дотичних напружень в тілі головки на глибині 2,5-3,5 мм, які перевищують межу текучості і витривалості металу.

4. Проведені стендові експериментальні випробування дослідних зразків дефектних рейок на багатоциклову витривалість (на базі $N_0=2,1 \times 10$ циклів) при одночасному дефектоскопному контролі появи і розвитку дефектів у голівці й підшві рейки.

5. Методами математичної статистики встановлена графічна і аналітична залежність вилучення рейок з експлуатації за причиною появи контактних дефектів виду 11.2-11.1 на поверхні кочення головки рейок, від пропущеного по рейкам тоннажу.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. Результати статистичних досліджень вилучених з експлуатації дефектних рейок, в залежності від пропущеного тоннажу, дозволили спрогнозувати терміни служби рейок метрополітену по дефектності .

2. Результати виконаних стендових лабораторних випробувань дослідних зразків дефектних рейок з дефектами контактної-втомного типу, що були вилучені з експлуатації згідно діючих нормативів, дозволили визначити залишковий ресурс для дефектних рейок типу Р50 для умов експлуатації метрополітену.

3. На основі виконаних досліджень розроблені нові нормативні терміни служби рейок типів Р50 і Р65 для різних категорій колій для умов експлуатації Київського метрополітену, нові норми збільшено відносно існуючих відповідно на 33,3% для Р50 і 16,7% для Р65.

4. Нові розроблені нормативи внесені в нову редакцію “Технічних умов на експлуатацію рейок типів Р50 і Р65 для Київського метрополітену», що була розроблена колективом кафедри “Залізнична колія та колійне господарство” ДЕТУТ при безпосередній участі автора дисертації, затверджена Київським метрополітеном і впроваджена в дію у 2015 році.

Особистий внесок здобувача. Постановку мети і задач досліджень виконано спільно з науковим керівником. Усі наукові положення, розробки і результати досліджень, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані особисто

автором. Теоретичні розрахунки контактної взаємодії колеса та рейки, із застосуванням методу кінцевих елементів (МКЕ) виконано в співавторстві з кафедрою "Теоретичної і прикладної механіки" ДЕТУТ. Експериментальні дослідження на лабораторних стендах і на колії, що експлуатується в метрополітені, автором виконані під керівництвом наукового керівника, в складі колективу співвиконавців кафедри "Залізнична колія та колійне господарство" ДЕТУТ. Все це знайшло відображення в науково-технічних звітах по НДР ДЕТУТ (№55-П-13, 2013-2015 рр.), в наукових працях автора, що опубліковані за темою дисертації, а також приведено в тексті дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційних досліджень доповідались на 2-х міжнародних науково-практичних конференціях з проблем: «Безпека руху і наукові засади експертних досліджень транспортних пригод та інженерних споруд» (м. Львів, вересень 2015 р.); «Маркетинг и логистика в системе менеджмента на железнодорожном транспорте» (м. Кам'янець-Подільський, жовтень, 2015 р.); на науково-технічних семінарах кафедри «Залізнична колія та колійне господарство» ДЕТУТ (Київ, квітень 2015, листопад 2015 рр.), кафедри «Колія та колійне господарство» УкрДУЗТ (Харків, грудень 2015 р.), а також на Технічній Раді служби колії, тунельних споруд і будівель КП «Київський метрополітен» (Київ, березень 2015 р., квітень 2015 р.).

Повністю дисертаційна робота доповідалась і обговорювалась на розширеному науковому семінарі кафедр "Залізнична колія та колійне господарство", "Теоретична і прикладна механіка" і "Будівельні конструкції та споруди" Державного економіко-технологічного університету транспорту (Київ, 12.11.2015 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації, результати теоретичних і експериментальних досліджень опубліковано у 8 основних [1-8] і 5 додаткових друкованих наукових працях [9-13], а також у 3-х науково-технічних звітах з НДР кафедри «Залізнична колія та колійне господарство» ДЕТУТ. З 8-ми основних наукових праць 5 видано у виданнях України, які включені до переліку міжнародних науково-метричних баз, 1 – є нормативно-технічне видання КП «Київський метрополітен» [6], 2 інших статті опубліковані в збірниках наукових праць ДЕТУТ [1, 3]; з 5-ти додаткових праць 2 – є нормативно-технічними виданнями Укрзалізниці і Київського метрополітену [9, 13], 1 – є навчальний посібник [11], 1 – є стаття в збірнику наукових праць ДЕТУТ [10], 1 – є тези доповіді на міжнародній науково-практичній конференції [12].

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти основних розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і чотирьох додатків. Повний обсяг роботи складає 263 сторінок друкованого тексту. В тому числі 113 рисунків на 52 сторінках, 26 таблиць на 11 сторінках, список літератури складає 98 найменувань на 9 сторінках, 4 додатки на 38 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Вступ містить загальну характеристику роботи. Обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, доведено новизну і практичне значення отриманих

результатів, вказано на особистий внесок автора в роботу, приведено інформацію про апробацію та публікації одержаних результатів, надано огляд літератури з напрямку питань дисертаційної роботи – підвищення ресурсів роботи рейок. Цими питаннями, в тому числі підвищення їх контактної витривалості, протягом всього періоду існування залізниць займалось багато вітчизняних і закордонних вчених. Серед вітчизняних вчених це професори: К.Ю. Цеглинський, С.П. Тимошенко, Н.М. Беляєв, Г.М. Шахунянц, В.Н. Данілов, В.Г. Альбрехт, Є.А. Шур, В.Ф. Яковлев, О.П.Єршков, Н.І. Карпущенко, М.П. Смірнов, Ю.Д. Волошко, О.М. Даренський, В.В. Рибкін; кандидати технічних наук: А.В. Великанов, В.Н. Дьяконов, Л.П. Мелентьєв, В.Л. Порошин, П.П. Цуканов, М.Б. Смірнова, А.М. Ніконов, А.Ю. Абдурашитов, В.І. Матвецов, М.І. Уманов, О.М. Патласов та інші.

Серед закордонних вчених, що займались і займаються проблемами підвищення ресурсу роботи рейок, можна вказати наступних авторів: Г. Шрамм і Х. Гессель (Німеччина), Метчел і Альбек (США), Т. Тосихико, К. Сатосі, (Японія), К. Балух (Польща), М. Георгієв (Болгарія) та інші.

Дослідженнями роботи рейок в залізничних коліях метрополітенів, на жаль, займалось значно менше вчених і науковців, яких неважко перерахувати у декількох строках: це професори Г.Е. Андрєєв, Є.А. Шур, В.І. Ангелейко, С.І. Клінов, Е.І. Даніленко, В.В. Косарчук; канд. техн. наук: В.Ф. Барабошин, В.І. Матвецов, А.Ю. Абдурашитов, О.О. Шехватов, В.П. Шраменко, П.В. Ковтун, М.І. Карпов, О.В. Агарков.

В заключній частині вступу сформульовані мета і задачі досліджень.

У першому розділі проведено аналіз технічних характеристик й умов експлуатації залізничних колій Київського метрополітену. Надано загальну характеристику ліній метрополітену та особливості улаштування конструкції верхньої будови колії. Проаналізовано план і профіль колій на лініях Київського метрополітену, особливості експлуатаційних умов та пропускаємий тоннаж по рейках Київського метрополітену.

На основі виконаних аналізів встановлено:

1) В якості типової і найбільш поширеної конструкції верхньої будови колії на лініях Київського метрополітену в теперішній час застосовується конструкція з підкладковими рейковими скріпленнями на дерев'яних шпалах, замонолічених в колійний бетон зі скріпленнями типу «Метро» (41,5%) і типу КДП (з пружною клеєю) (29%) і з нетермозміцненими рейками типу Р50 (70,5%) і Р65 (29,5%).

2) Траса ліній метрополітену складається з прямих і кривих ділянок з радіусами від $R_{\min}=300$ м до $R_{\max}=1500-3000$ м. Наявність кривих ділянок колії на деяких напрямках метрополітену складає близько половини протяжності лінії. Переважну більшість складають криві радіусами 400-600 м.

3) Поздовжній профіль тунелів метрополітену відповідно до діючих нормативів виконаний без горизонтальних площадок з елементами підйомів та спусків, найменші ухили складають 3‰, найбільші не перевищують 38÷45‰.

4) Встановлений нормативний тоннаж для суцільної заміни рейок (за дефектністю) згідно діючих до 2014 р. «Технічних умов на експлуатацію рейок Київського метрополітену» є наступний (див. табл. 1).

5) Аналіз реального пропусканого тоннажу по рейках метрополітену з розподілом по типах рейок і протяжності колії в % проведено на рис. 1, а і 1, б.

Таблиця 1 – Встановлений нормативний тоннаж для суцільної заміни рейок (згідно діючих до 2014 р. ТУ Київського метрополітену)

№	План лінії	Пропущений тоннаж для рейок, млн. т. бруто	
		P50	P65
1	Прямі і криві радіусом 1001 м і більше	450	600
2	Криві радіусом 1000-801 м	400	550
3	Криві радіусом 800-651 м	350	500
4	Криві радіусом 650-501 м	300	400
5	Криві радіусом 500-351 м	250	300
6	Криві радіусом менше 350 м	200	250

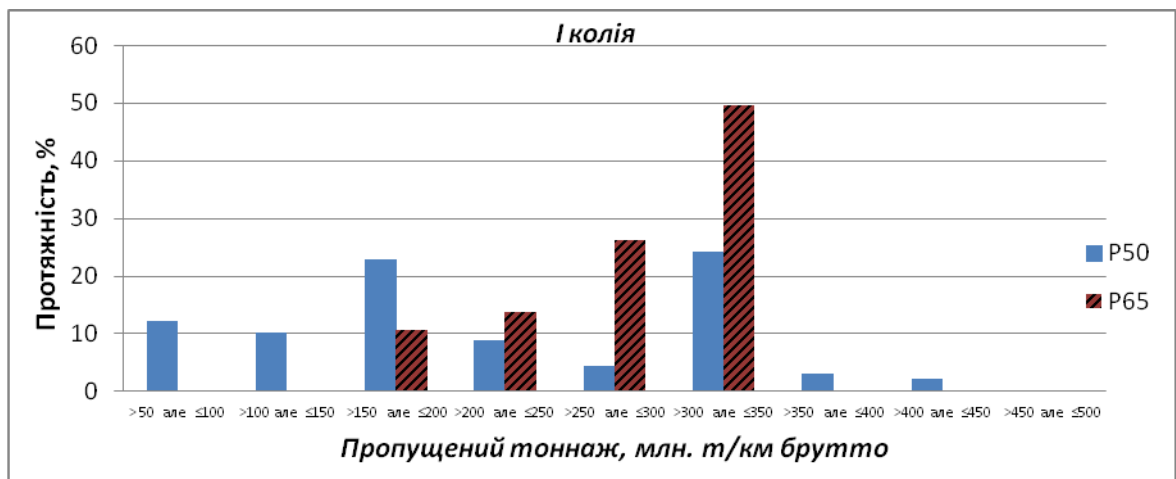


Рис. 1, а – Розподіл протяжності колії з пропущеним тоннажем в цілому по Київському метрополітену для першої колії

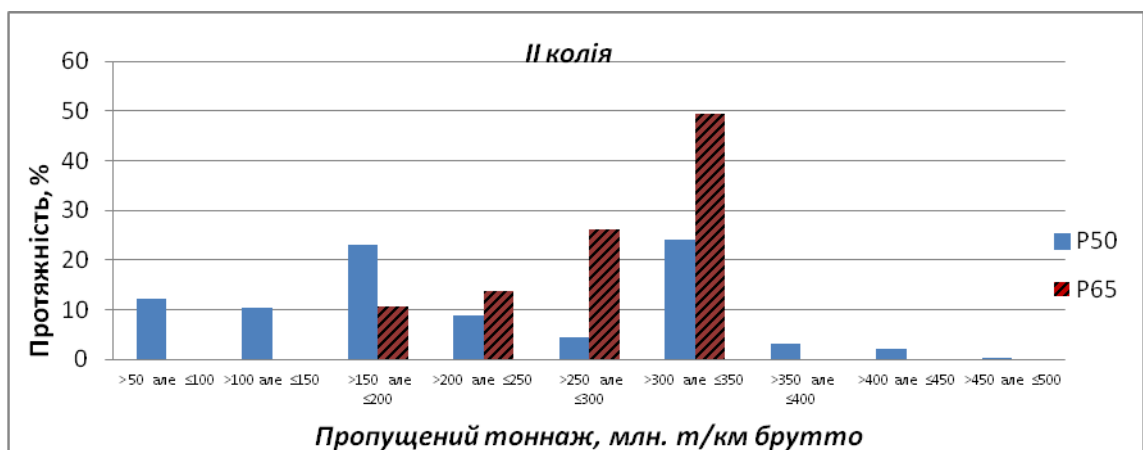


Рис. 1, б – Розподіл протяжності колії з пропущеним тоннажем в цілому по Київському метрополітену для другої колії

У другому розділі викладені статистичні дослідження вилучення рейок по дефектах при експлуатації в коліях метрополітену та прогнозування нормативного тоннажу вилучення рейок по дефектності залежно від умов експлуатації. Дослідження зроблені на основі аналізу утворення дефектних рейок в коліях, що експлуатувались на усіх лініях метрополітену за період 2003-2013 рр.

Результати статистичних досліджень показали, що найбільшу кількість виявлених дефектних рейок у головних коліях Київського метрополітену складають дефектні рейки за кодом 11.2-11.1 – 56,5 % від усіх виявлених дефектних і гостродефектних рейок за період 2003-2013 років. За цей же період в коліях метрополітену було виявлено 18% гостродефектних рейок, переважна кількість яких за кодами 30Г.1-2 і 21.1-2.

Гостродефектні рейки підлягають негайному вилученню з колії після виявлення. Дефектні рейки як такі, що не створюють загрози безпеці руху поїздів, підлягають заміні у плановому порядку. Тому після виявлення дефектні рейки можуть перебувати в експлуатації до початку перетворення виявлених дефектів в такі, що відповідно до класифікації дефектів потребують обмеження швидкостей руху поїздів у метрополітені.

Для проведення експериментально-статистичного аналізу вилучення дефектних і гостродефектних рейок залежно від пропущеного тоннажу були використані натурні журнали обліку дефектних рейок, які експлуатувались у головних коліях метрополітену за період з 2003 по 2013 рр.

Для проведення аналізу статистичних даних був застосований метод регресійного аналізу, а саме метод найменших квадратів, заснований на аналізі графічного зображення даних, що підлягають обробці. На основі графічного аналізу статистичних даних було обрано визначати як найбільш відповідну апроксимуючу функцію залежності дефектоутворення на рейках від пропущеного тоннажу $y = f(T)$ у вигляді степеневі залежності:

$$y = (x, a, b) = a \cdot x^b \text{ при } a > 0 \quad (1)$$

де y – кількість дефектів (шт/км)

x – пропущений тоннаж T (млн. т брутто).

Оцінка достовірності рівняння регресії здійснювалась за допомогою F -критерія Фішера, на основі аналізу дисперсії, тобто суми квадратів відхилень змінних величини y_i від середнього значення \bar{y} . В результаті аналізу статистичних даних були побудовані криві залежності кількості виявлених дефектів рейок від пропущеного по них тоннажу $y = f(T)$.

На графіках ламаними кривими зображено результати аналізу статистичних даних, отриманих в реальних умовах. Плавними кривими зображено криві степеневі функції, що побудовані за допомогою регресійного аналізу таким чином, щоб вони найбільш точно описували експериментальні дані. На рис. 2, а, б, в, г наведено приклад побудованих графіків залежності вилучення рейок в дефектні від пропущеного тоннажу.

Залежності побудовані окремо для кожної лінії метрополітену, які мають різні експлуатаційні умови, а також окремо для прямих і кривих ділянок.

Результати досліджень показали, що більшість дефектів викришування металу на боковій робочій викружці головки рейки за кодом 11.1-11.2 з'являється в кривих ділянках колії на зовнішніх нитках.

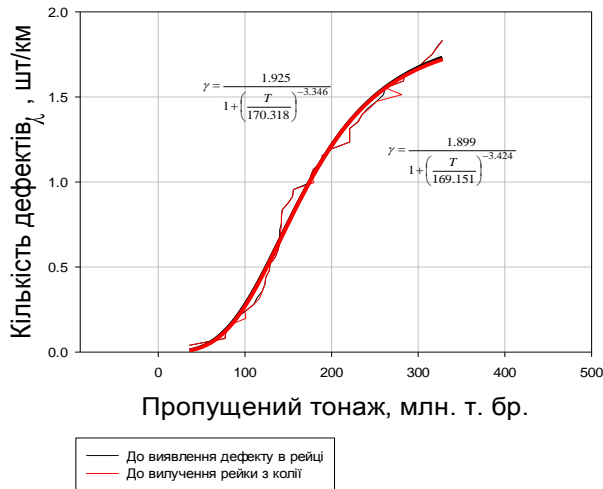


Рис. 2, а – Святошино-Броварська лінія, пряма, перша колія

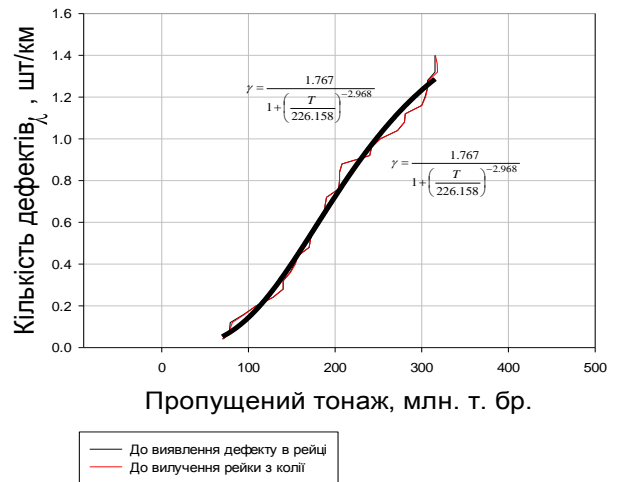


Рис. 2, б – Святошино-Броварська лінія, пряма, друга колія

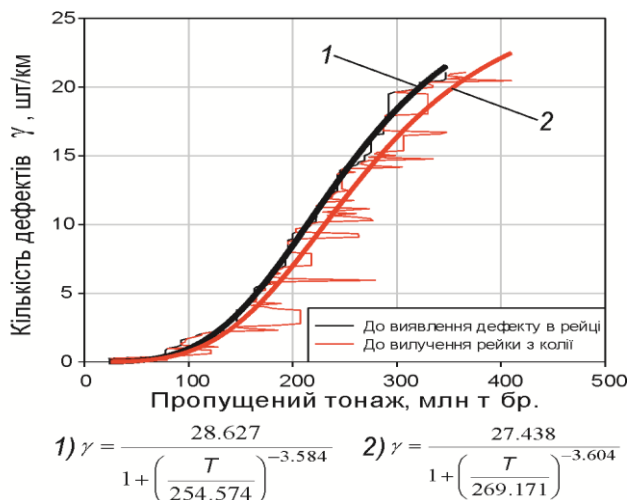


Рис. 2, в – Святошино-Броварська лінія, крива, перша колія

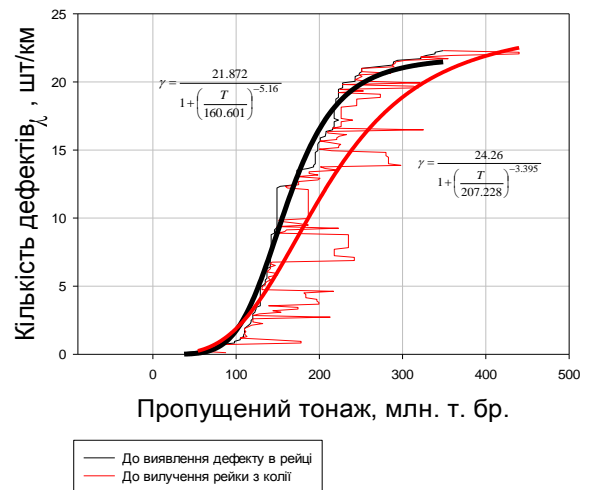


Рис. 2, г - Святошино-Броварська лінія, крива, друга колія

Найбільша інтенсивність як виявлення, так і вилучення дефектних рейок на коліях Київського метрополітену відбувається у період напрацювання перших 100÷250 млн. т бруто пропущеного тоннажу. При подальшому напрацюванні пропущеного тоннажу інтенсивність виходу рейок у дефектні поступово зменшується.

Аналіз проведених статистичних досліджень показав, що питомий вихід нетермозміцнених рейок типу Р50 у дефектні на прямих ділянках колії зовсім незначний і коливається в межах 0,2-0,4-1,0 шт/км на кожні 100 млн. т бруто пропущеного тоннажу, залежно від інтенсивності руху поїздів. На кривих ділянках

колії питомий вихід рейок у дефектні різко зростає і може досягати 8-10 шт/км і більше на кожні 100 млн. т брутто пропущеного тоннажу.

На основі обробки фактичних даних утворення дефектних рейок при накопиченні пропущеного тоннажу методами математичної статистики з використанням графоаналітичного аналізу встановлені математичні залежності між кількістю допустимих дефектів, що з'являються на голівці рейки $[\gamma]$ (шт.), та нормативним пропущеним по рейках тоннажем $T_{норм}$ (млн. т брутто). Математичні залежності мають наступний вид:

для кривих ділянок Святошино-Броварської лінії:

$$\text{перша колія} \quad T_{норм}^{-3,604} = \left(\frac{27,438}{[\gamma]} - 1 \right) \cdot 269,171^{-3,604} \quad (2)$$

$$\text{друга колія} \quad T_{норм}^{-3,395} = \left(\frac{24,26}{[\gamma]} - 1 \right) \cdot 207,228^{-3,395} \quad (3)$$

для кривих ділянок Куренівсько – Червоноармійської лінії:

$$\text{перша колія} \quad T_{норм}^{-4,73} = \left(\frac{9,097}{[\gamma]} - 1 \right) \cdot 225,083^{-4,73} \quad (4)$$

$$\text{друга колія} \quad T_{норм}^{-3,226} = \left(\frac{16,467}{[\gamma]} - 1 \right) \cdot 213,471^{-3,226} \quad (5)$$

Математичні залежності для прямих ділянок колії наведені в дисертації.

Отримані математичні залежності (з урахуванням результатів теоретичних і експериментальних даних розділів 3 і 4) дозволили обґрунтовано виконати прогнозування виходу рейок за дефектністю, залежно від пропущеного тоннажу, окремо для прямих і кривих ділянок колії Київського метрополітену.

В результаті визначено, що при нормативі сумарного одиночного виходу рейок за період експлуатації у дефектні $\gamma=8$ шт./км можна прогнозувати нормативний пропущений тоннаж для рейок типу Р50 (нетермозміцнених) для прямих ділянок у межах 500÷600 млн. т брутто. Для кривих ділянок колії величину нормативного тоннажу необхідно зменшувати в межах від 15% до 60 %, залежно від радіусу кривої (див. розд. 5).

У третьому розділі роботи виконані теоретичні дослідження довговічності рейок типу Р50 (нетермозміцнених), що експлуатуються на коліях Київського метрополітену, з позицій напружено-деформативного стану металу в зоні контактної взаємодії голівки рейки з колесами рухомого складу. Для цього виконано аналіз механізму утворення і кінетики розвитку контактно-втомних ушкоджень на поверхні кочення голівки рейки, виконані теоретичні розрахунки напружено-деформативного стану голівки рейки в зоні її контакту з колесами рухомого складу і проаналізовано результати розрахунків з позицій сучасної методики оцінки довговічності металу голівки рейок, з урахуванням умов їх експлуатації при роботі на циклічну довговічність.

Розрахунки контактних напружень в голівці рейки виконані із використанням різних методик, в тому числі із використанням класичної теорії Герца-Біляєва і з

застосуванням методики комп'ютерного рішення задачі за методом кінцевих елементів (МКЕ).

На рис. 3 наведено схему контактної взаємодії колеса і рейки, і показано вплив наближення контактної навантаження до краю голівки на зміну відносних деформацій в металі поверхневого шару голівки рейки.

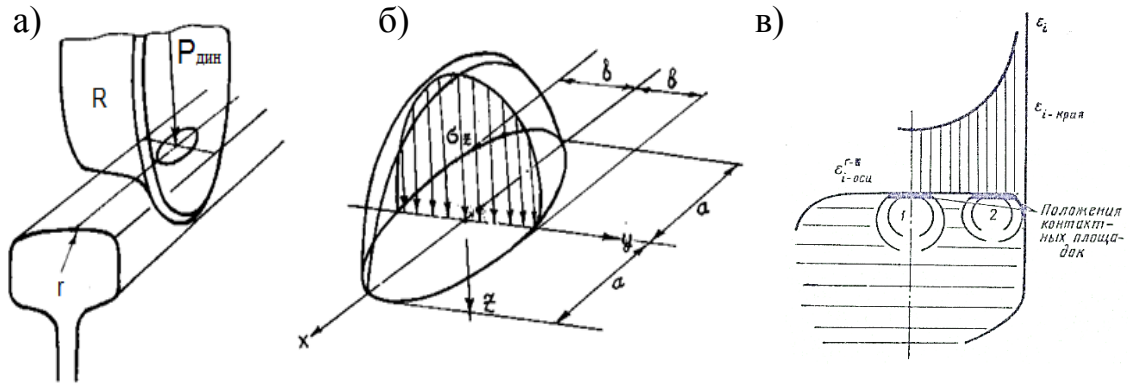


Рис. 3 – Схема контактної взаємодії колеса і рейки

Згідно класичної теорії Герца-Біляєва (з урахуванням коригувань проф. Г.М. Шахунянца) формули для визначення контактних напружень в голівці рейки мають наступний вид:

$$\begin{aligned}
 \sigma_z^{\max} &= \frac{\varphi \cdot m_0}{\kappa_\phi} \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{\text{дин}} \cdot E^2}{R^2}} & \text{а)} \\
 2\tau &= \frac{0,63 \cdot \varphi \cdot m_0}{\kappa_\phi} \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{\text{дин}} \cdot E^2}{R^2}} & \text{б)} \\
 2\tau_n &= \frac{0,63 \cdot \varphi \cdot n_0}{\kappa_\phi} \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{\text{дин}} \cdot E^2}{r^2}} & \text{в)} \\
 a &= m \cdot \sqrt[3]{\frac{3P_{\text{дин}}(1-\nu)^2}{2E \cdot (A+B)}}; & \text{б)} \\
 b &= \frac{n}{m} a & \text{в)}
 \end{aligned} \tag{6}$$

де σ_z^{\max} - найбільші нормальні контактні напруження

τ - найбільші дотичні напруження, що виникають на кінцях більшої осі еліпса контакту в тілі голівки на глибинах $z_0=0,2-0,5 a$ (при $r/R \geq 0,33$);

τ_n - найбільші дотичні напруження, що виникають на поверхні голівки рейки в центрі еліпса контакту (при $r/R < 0,33$);

$P_{\text{дин}}$ - величина динамічної вертикальної сили в контактні колеса з рейкою.

За результатами розрахунків за класичною теорією за методом Герца-Біляєва (з урахуванням коригувань професорів Г.М. Шахунянца і В.Ф. Яковлева) отримані наступні результати напружень в контактній зоні голівки рейки типу Р50 при дії колісних навантажень метрополітену $P_{\text{дин}}=90$ кН.

Таблиця 2

№ п/п	Назва показника	Позначення	Одиниці виміру	Величина
<i>З урахуванням коригування формули Герца-Біляєва згідно досліджень проф. В.Ф. Яковлєва (на краю голівки)</i>				
4'	$\sigma_{z_{(\Gamma-B-Y)}}^{\max} = (2,0 \div 2,5) \cdot \sigma_{z_{(\Gamma-B)}}^{\max} = 2,0 \cdot 755,2$	$\sigma_{z_{(\Gamma-B-Y)}}^{\max}$	МПа	1510,4
5'	$\tau_{z_y_{(\Gamma-B-Y)}}^{\max} = 2,5 \cdot \tau_{\max_{(\Gamma-B)}} = 2,5 \cdot 290,4$	$\tau_{\max_{(\Gamma-B-Y)}}$	МПа	726,0
6	Глибина від поверхні кочення на якій з'являються найбільші дотичні напруження	z_0	мм	3,427
7	Еквівалентні напруження в тілі голівки рейки на глибині z_0	$\sigma_{екв}^I$	МПа	1016,4
8	Еквівалентні напруження на поверхні кочення голівки (в центрі контактної еліпси)	$\sigma_{екв}^{II}$	МПа	453,12
9	Еквівалентні напруження на поверхні кочення (в кінці великої осі еліпсу)	$\sigma_{екв}^{III}$	МПа	351,16

На наступному етапі були виконані розрахунки контактних напружень в голівці рейки із застосуванням комп'ютерного рішення задачі за сучасною методикою за методом кінцевих елементів (МКЕ). Метод МКЕ є чисельним методом розв'язання крайових задач математичної фізики, який дозволяє виконувати розрахунки для тіл взаємодії, що мають достатньо складу форму, якою і є рейка з колесом.

Для визначення полів напружень і деформацій у зоні контакту рейки з колесом використовували геометричну модель, яка являла собою ділянку рейки довжиною 600 мм (міжшпальна відстань) з шарнірними опорами на торцях, що забезпечує урахування впливу величини вертикального прогину рейки на розміри еліпсу контакту (рис. 4).

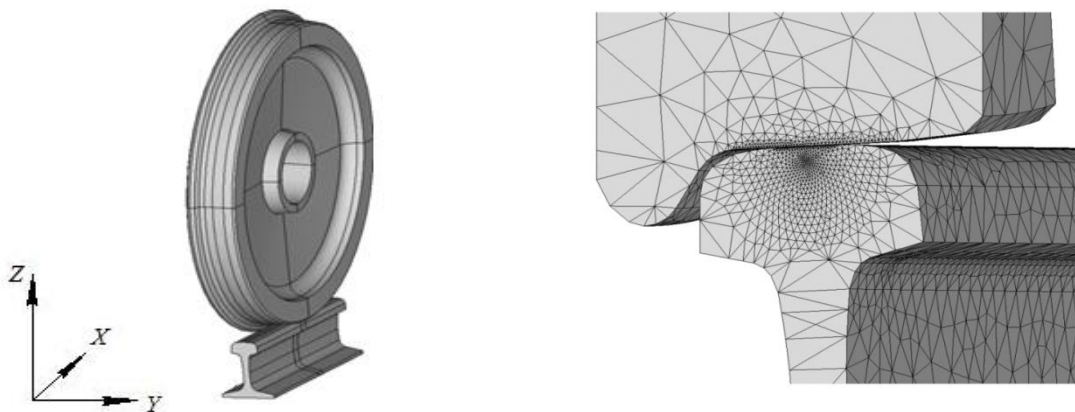


Рис. 4 – Геометрична модель контактної взаємодії колеса та рейки

При вирішенні задачі за методом МКЕ фізична область розбивається на підобласті або кінцеві елементи. Невідомі змінні апроксимуються функцією спеціального вигляду по усій підобласті. Параметри цих апроксимацій в подальшому стають невідомими параметрами задачі. Підстановка апроксимацій у визначальні рівняння дає систему множини рівнянь з невідомими параметрами.

Розв'язуючи ці рівняння, визначають значення невідомих параметрів, а отже, отримують чисельне наближене розв'язання задачі.

При вирішенні розглядуваної задачі в якості основних невідомих при заданих умовах механічного навантаження, було прийнято відшукування полів напружень і деформацій:

$$\sigma_{ij}(x, y, z); \quad \varepsilon_{ij}(x, y, z); \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (7)$$

а також трьох компонентів вектора переміщень:

$$U(x, y, z), V(x, y, z), W(x, y, z). \quad (8)$$

Процес рішення зводиться до встановлення зв'язку між п'ятнадцятьма невідомими функціями: шести компонентами тензора напружень, шести компонентами тензора деформацій і трьома компонентами вектора переміщень.

Загальна замкнута система рівнянь механіки деформуємого твердого тіла включає наступні 15 рівнянь, які повинні виконуватись для будь-якої точки всередині тіла.

Статичні рівняння – диференційні рівняння рівноваги:

$$\begin{aligned} \partial \sigma_x / \partial x + \partial \tau_{xy} / \partial y + \partial \tau_{xz} / \partial z + f_x^v &= 0 \quad \left[= \rho \left(\partial^2 U / \partial t^2 \right) \right]; \\ \partial \tau_{yx} / \partial x + \partial \sigma_y / \partial y + \partial \tau_{yz} / \partial z + f_y^v &= 0 \quad \left[= \rho \left(\partial^2 V / \partial t^2 \right) \right]; \\ \partial \tau_{zx} / \partial x + \partial \tau_{zy} / \partial y + \partial \sigma_z / \partial z + f_z^v &= 0 \quad \left[= \rho \left(\partial^2 W / \partial t^2 \right) \right], \end{aligned} \quad (9)$$

де f_x^v, f_y^v, f_z^v - компоненти об'ємної сили; ρ - щільність деформуємого тіла;

t - час.

Статичні рівняння доповнюються умовами на поверхні тіла (граничними умовами другого роду), які характеризують розподіл зовнішнього навантаження на заданих ділянках поверхні S тіла (силові граничні умови).

$$\begin{aligned} f_x^S &= \sigma_x n_x + \tau_{xy} n_y + \tau_{xz} n_z; \\ f_y^S &= \tau_{yx} n_x + \sigma_y n_y + \tau_{yz} n_z; \\ f_z^S &= \tau_{zx} n_x + \tau_{zy} n_y + \sigma_z n_z, \end{aligned} \quad (10)$$

де n_x, n_y, n_z - направляючі косинуси; причому в кожній точці поверхні $n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = 1$.

Геометричні рівняння (співвідношення Коші) – зв'язують компоненти тензора деформацій з компонентами вектора переміщень:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \partial U / \partial x; \quad \gamma_{xy} = \partial U / \partial y + \partial V / \partial x; \\ \varepsilon_y &= \partial V / \partial y; \quad \gamma_{yz} = \partial V / \partial z + \partial W / \partial y; \\ \varepsilon_z &= \partial W / \partial z; \quad \gamma_{zx} = \partial W / \partial x + \partial U / \partial z; \end{aligned} \quad (11)$$

Компоненти тензора деформацій повинні задовольняти умовам неперервності деформацій (умови сумісності Сен-Венана):

$$\left. \begin{aligned} \partial^2 \varepsilon_x / \partial y^2 + \partial^2 \varepsilon_y / \partial x^2 &= \partial^2 \gamma_{xy} / \partial x \partial y; \\ \partial^2 \varepsilon_y / \partial z^2 + \partial^2 \varepsilon_z / \partial y^2 &= \partial^2 \gamma_{yz} / \partial y \partial z; \\ \partial^2 \varepsilon_z / \partial x^2 + \partial^2 \varepsilon_x / \partial z^2 &= \partial^2 \gamma_{zx} / \partial z \partial x; \\ \partial / \partial x (-\partial \gamma_{yz} / \partial x + \partial \gamma_{zx} / \partial y + \partial \gamma_{xy} / \partial z) &= 2\partial^2 \varepsilon_x / \partial y \partial z; \\ \partial / \partial y (-\partial \gamma_{zx} / \partial y + \partial \gamma_{xy} / \partial z + \partial \gamma_{yz} / \partial x) &= 2\partial^2 \varepsilon_y / \partial z \partial x; \\ \partial / \partial z (-\partial \gamma_{xy} / \partial z + \partial \gamma_{yz} / \partial x + \partial \gamma_{zx} / \partial y) &= 2\partial^2 \varepsilon_z / \partial x \partial y; \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

При вирішенні даної задачі геометричні рівняння і рівняння зв'язку напружень з деформаціями підставляються у рівняння з рівноваги і після деяких перетворень у заключному вигляді отримуються так звані рівняння Ламе, які в якості невідомих мають лише переміщення:

$$\left[\begin{aligned} (\lambda + G) \frac{\partial(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)}{\partial x} + G \nabla^2 U + f_x^v &= 0; \\ (\lambda + G) \frac{\partial(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)}{\partial y} + G \nabla^2 V + f_y^v &= 0; \\ (\lambda + G) \frac{\partial(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)}{\partial z} + G \nabla^2 W + f_z^v &= 0; \end{aligned} \right] \quad (13)$$

$$\text{причому: } \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{\partial U}{\partial x^2} + \frac{\partial V}{\partial y^2} + \frac{\partial W}{\partial z^2}$$

де E – модуль пружності першого роду; G – модуль зсуву; ν – коефіцієнт Пуассона.

$$\lambda = \frac{\nu E}{[(1 + \nu)(1 - 2\nu)]}; \quad U, V, W \text{ – компоненти вектору переміщень,}$$

$$\nabla^2 \text{ – диференціальний оператор виду: } \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

У кінцевому вигляді рівняння Ламе, доповнені граничними умовами, визначають постановку задачі в переміщеннях. При цьому усі невідомі функції виражаються через переміщення, і система розв'язувальних рівнянь дискретизованої задачі в якості невідомих містить лише вузлові значення переміщень. Саме в такій постановці метод переміщень і використовувався в дисертації при вирішенні поставленої задачі за допомогою методу МКЕ.

Для рішення задачі за методом МКЕ застосовувався пакет прикладних програм «SAFE-3D», розроблений кафедрою «Теоретична і прикладна механіка» ДЕТУТ під керівництвом д.т.н., професора В.В. Косарчука.

Рішення задачі було виконане для різних схем розміщення контактної зони на голівці рейки: від центральної осі до переміщення її до краю голівки. Приклади

результатів розрахунків контактних напружень в голівці рейки за методом МКЕ наведені на рисунках 5 і 6.

σ_x	σ_y	σ_z	τ_{yz}	τ_{xz}	τ_{xy}	σ_{eqv}	σ_3	σ_2	σ_1
-188.60	-224.25	-790.11	17.725	-0,09	-0,015	585.31	-188.07	-224.25	-790.64

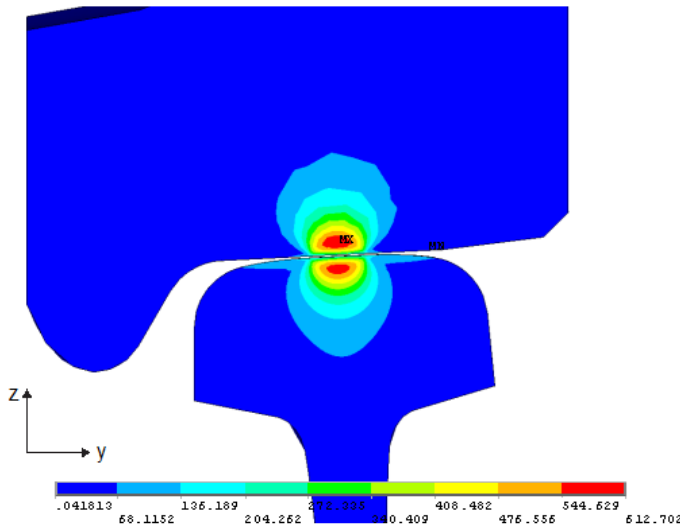


Рис. 5 – Графік σ_{eqv} , МПа (при навантаженні від колеса в середині голівки, схема №1)

σ_x	σ_y	σ_z	τ_{yz}	τ_{xz}	τ_{xy}	σ_{eqv}	σ_3	σ_2	σ_1
-528.96	-686.23	-1507.4	269.59	-3.6520	-5.5957	1022.9	-459.42	-686.41	-1576.7

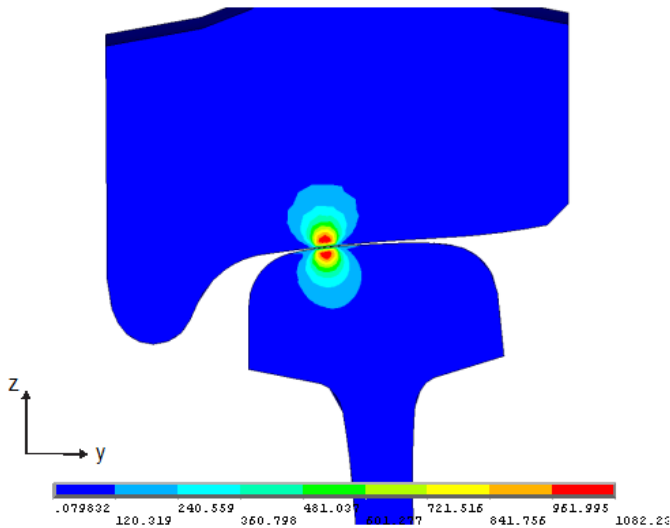


Рис. 6 – Графік σ_{eqv} , Мпа (при наближенні навантаження до краю голівки, схема №3)

Розрахунки показали, що:

1) Максимальні нормальні контактні стискаючі напруження діють на напрямку прикладеного вертикального навантаження і досягають $\sigma_z=1507$ МПа, що більше ніж у три рази перевищує межу текучості рейкової сталі для незагартованих рейок $\sigma_{0,2}=480$ МПа.

2) При зміщенні контактної площадки від центральної осі рейки до краю голівки нормальні напруження зростають практично у 2 рази (схема №1 і №3).

3) Найбільші дотичні напруження при прийнятій схемі навантаження №3 досягають $\tau_{yz}=270$ МПа. Але, як показали розрахунки за методом проф. Яковлева, при наближенні до краю голівки ці напруження можуть досягати $\tau_{max}=720-730$ МПа, що суттєво (в 1,5 рази) перевищує межу текучості рейкової сталі ($\sigma_{0,2}=480$ МПа). Ці напруження діють на глибині від поверхні $z_0=2,3-3,5$ мм і саме вони створюють найбільшу загрозу появи і розвитку контактних-втомних дефектів викришування металу біля краю голівки за кодом 11.1-11.2.

4) Розрахунки показали, що еквівалентні напруження в усіх зонах контактної взаємодії рейки з колесами в усіх випадках навантаження перевищують допустимі значення напружень за умовами витривалості металу $\sigma_{екв} \gg [\sigma_r]$. Але при розміщенні контактного еліпсу на поверхні кочення посередині голівки рейки не з'являється реалізація і розвиток остаточних деформацій в мікрооб'ємах металу в середині тіла голівки з причини 3-х вісного приблизно рівномірного стиску, який не дає можливості розвитку остаточних деформацій.

5) Порівняння результатів розрахунків контактних напружень за класичною методикою і методикою МКЕ показало їх хорошу збіжність в межах 5-23%, що свідчить про можливість застосування при дослідженнях обох методів.

У четвертому розділі виконана експериментальна оцінка залишкового ресурсу дефектних рейок, вилучених з експлуатації головних колій Київського метрополітену. Для цього проведені експериментальні випробування дефектних рейок на витривалість. Для експериментальних досліджень були використані дослідні зразки рейок Р50 довжиною 1200 мм, які були вирізані з чотирьох дефектних рейок, які у плановому порядку були вилучені з експлуатуємих колій метрополітену після досягнення дефектності, що перевищує нормативно-допустиму. Дослідження на витривалість були проведені на гідравлічному пульсаторі типу ZDM-10Pu при прикладенні циклічного пульсаційного навантаження, еквівалентного максимальній динамічній силі $P_{дин}^{max}=90$ кН від коліс рухомого складу метрополітену.

Випробування на циклічну витривалість проводились за типовою методикою ВНДІЗТ, тобто на базі випробувань $N = 2 \cdot 10^6$ циклів навантажень з коефіцієнтом асиметрії циклу $r = -0,2$. Випробування проводились за 2-ма схемами навантаження рейки: 1 – при положенні рейки голівкою вгору; 2 – при положенні рейки голівкою вниз. Схема випробувань наведена на рис. 7 і 8.

У процесі експериментальних випробувань здійснювався періодичний дефектоскопний ультразвуковий контроль дослідних зразків, який виконувався періодично, після кожних $4 \cdot 10^5$ циклів навантажень: відповідно $N_i = 4 \times 10^5$; 8×10^5 ; $1,2 \times 10^6$; $1,6 \times 10^6$; $2,0 \times 10^6$

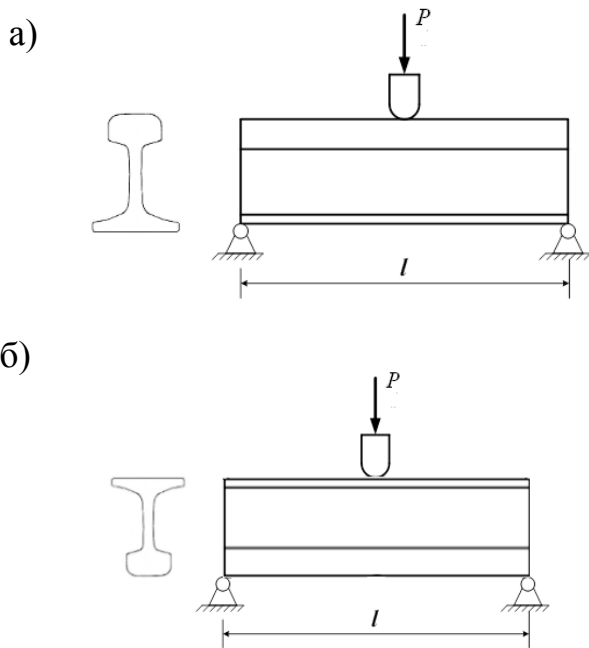


Рис. 7 – Схема трьох точкового згину зразка рейки при випробуванні на циклічну витривалість: а) за схемою №1 (головкою вверх); б) за схемою №2 (головкою вниз)



Рис. 8 – Загальний вигляд випробувальної установки із встановленим зразком рейки

Результати експериментальних випробувань показали, що:

1) До початку випробувань у всіх дослідних зразках рейок глибина викришування металу на боковій робочій викружці голівки (за дефектом 11.2) не перевищувала 4 мм при довжинах нерівностей, які у 2 рази перевищували норматив 25 мм;

2) Аналіз дефектоскопного контролю дослідних зразків рейок після проведення повного циклу пульсаційних випробувань на базі $2 \cdot 10^6$ циклів за схемою №1 (голівкою рейки вверх) показав, що розвитку дефекту 11.2 або перетворення його в інші дефекти в голівці рейки – не відбулось. Збільшення глибини викришування також практично не відбулось.

3) Також не було відмічено розвитку дефектів 11.2 або перетворення його в інші дефекти голівки рейки при випробуваннях за схемою №2 (голівкою вниз) при реалізації повного нормативного циклу пульсаційних випробувань базою $2 \cdot 10^6$ циклів.

4) Результати випробувань на циклічну витривалість на базі 2 млн. циклів з навантаженням, що відповідає експлуатаційним динамічним колісним навантаженням від вагонів метрополітену $P_{дин}^{max} = 90,0$ кН, показали, що рейки з дефектами коду 11.2, які вилучені з експлуатації згідно вимог діючих ТУ, можуть мати залишковий ресурс експлуатації не менше ніж $N = 2,0$ млн. циклів колісних

навантажень (що відповідає не менше 30 млн. т брутто додатково до пропущеного тону на момент вилучення рейки з експлуатації).

5) Додатково до випробувань на витривалість були проведені випробування дефектних рейок на злам при дії граничного вертикального навантаження (розділ 4.4). Випробування дослідних зразків рейок при статичному 3-точковому вигині показали, що рейки Р50 метрополітену витримали без зламу прикладення вертикальної статичної сили на голівку $P_{\max}=1200$ кН, а на підшву рейки $P_{\max}=800$ кН. Розшарування металу в робочій викружці голівки відбувалось після досягнення $P \approx 800$ кН.

У п'ятому розділі викладено дані про впровадження і практичну реалізацію результатів отриманих в дисертації і надана їх техніко-економічна оцінка.

На основі проведених статистичних досліджень і відповідно до методики розрахунків нормативних строків служби рейок за дефектністю, для прямих ділянок колії Київського метрополітену з нетермозміцненими рейками типу Р50 при нормативі сумарного одиночного виходу рейок за період експлуатації у дефектні $\gamma=6\div 8$ шт./км можна прогнозувати нормативний пропущений тону у межах 500÷600 млн. т брутто, залежно від конструкції колії (див. табл. 3).

Для кривих ділянок колії з радіусами менше 1000 м величину нормативного тону необхідно зменшувати в межах від 15% до 60 %, залежно від радіусу кривої (див. табл. 4).

Таблиця 3 – Нові нормативи пропущеного рейками тону для прямих і кривих із радіусами $R=1001$ м і більше (на основі досліджень 2014-2015 рр.)

Вид зміцнення	Конструкція колії	Пропущений тону, млн. т брутто, для прямих і кривих із радіусами 1001 м і більше для рейок типу	
		Р50	Р65
термічно зміцнені	безстикова	700	800
	ланкова	600	700
незагартовані	безстикова	600	700
	ланкова	500	600

Таблиця 4 – Нові нормативи пропущеного тону для кривих $R=1000$ м і менше (встановлені на основі досліджень 2014-2015 рр.)

			Пропущений тону, млн. т брутто для кривих із радіусами, м				
Тип рейки	Вид зміцнення	Конструкція колії	1000-801	800-651	650-501	500-351	350 і менше
Р 50	Термозміцнені	безстикова	630	550	500	420	350
		ланкова	550	500	410	360	275
	Не загартовані	безстикова	550	500	410	360	275
		ланкова	450	400	350	275	225
Р 65	Термозміцнені	безстикова	750	650	550	480	400
		ланкова	650	550	500	420	350
	Не загартовані	безстикова	650	550	500	420	350
		ланкова	550	500	410	360	275

В результаті виконаної роботи кафедрою колії ДЕТУТ при безпосередній участі автора дисертації, у 2014 р. розроблено і в 2015 р. впроваджено нові «Технічні умови на експлуатацію рейок на коліях Київського метрополітену», згідно яких регламентовані наступні норми нормативного тоннажу, що вказані в таблицях 3 і 4– для прямих і кривих.

Як можна бачити з порівняння таблиць 1, 3 і 4 нові нормативні строки служби рейок, що експлуатуються на коліях метрополітену підвищені для рейок Р50 на 33,3%, порівняно з раніше діючими нормативами, а для рейок Р65 на 16,7%.

Техніко-економічна ефективність впровадження результатів дисертаційних досліджень виконана за типовою методикою, що застосовується в колійному господарстві на залізничному транспорті на основі порівняння грошових і матеріальних витрат для двох варіантів верхньої будови колії (ВБК), що застосовуються при експлуатації на коліях метрополітену: 1-ий варіант ВБК – рейки Р50 нетермозміцнені, рейко-шпальна решітка із залізобетонними шпалами, при пропускній спроможності рейок 450 млн. т бруто за діючими до 2014 р. «Технічними умовами»; 2-ий варіант ВБК – та ж сама конструкція верхньої будови колії, що і в 1-му варіанті, але при новій пропускній спроможності рейок 600 млн. т бруто за новими «Технічними умовами», які запропоновані за результатами досліджень ДЕТУТ (2013-2015 рр.) і дисертаційних досліджень автора.

Для визначення порівняльної економічної ефективності варіантів ВБК застосована методика мінімальних сумарних приведених витрат:

$$P_i = K_i + \sum_{t=1}^{t_{kp}} E_{t_i} \eta_t + \sum_{t=0}^{t_{kp}} C_{t_i} \eta_t \Rightarrow \min \quad (14)$$

Де K_i - капітальні вкладення на укладку i -го варіанту конструкції колії, грн/км;

t_{kp} - строк служби найбільш довгострокового варіанту ВБК;

E_{t_i} - річні експлуатаційні витрати по i -му варіанту, грн/км за рік;

C_i - одночасні витрати (на комплексно-оздоровчі, середні та інші ремонти) по i -му варіанту в кожному конкретному році t_i , грн/км.

На основі проведених розрахунків сумарних приведених витрат двох варіантів ВБК зроблено такі висновки:

1) на експлуатацію верхньої будови колії по 2-му варіанту (підземна ділянка в тунелі, безстикова колія, рейки Р50, шпали дерев'яні з епурою 1680 шп/км, скріплення «Метро», пропускна спроможність 600 млн. т бруто), сумарні приведені витрати P_i є значно меншими ніж за 1-м варіантом (підземна ділянка, ланкова колія, пропускна спроможність рейок – 450 млн. т бруто). Це зумовлено тим, що безстикова колія має багато переваг порівняно з ланковою: пропускна спроможність рейок безстикової колії на 150 млн. т бруто більша порівняно з ланковою, таким чином строк експлуатації рейок для 2-го варіанту збільшиться на 6 років; за рахунок укладання безстикової колії витрати на капітальні вкладення та експлуатаційні витрати порівняно з ланковою колією зменшаться у 1,4 рази; значно скорочені витрати на планово-попереджувальні роботи для 2-го варіанту порівняно з 1-им варіантом – на 25-35%.

2) таким чином, з порівняння двох варіантів ВБК для підземної ділянки в тунелі можна констатувати, що очікуваний економічний ефект при застосуванні другого варіанту (при безстиківій колії) буде складати 16 млн. 065,7 тис. грн. за 24 роки. Або за один рік ця економія буде 669,4 тис. грн./на рік.

Саме так, з порівняння 2-х варіантів ВБК для наземної ділянки колії можна констатувати, що очікуваний економічний ефект при застосуванні 4-го варіанту ВБК (безстикова колія) буде складати 50 млн. 589,6 тис. грн. за 24 роки експлуатації. Або за один рік ця економія буде – 2 млн. 107,9 тис. грн./на рік.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В дисертації виконане комплексне наукове і практичне вирішення проблеми підвищення експлуатаційного ресурсу рейок для умов метрополітенів на прикладі Київського метрополітену.

2. На основі натурального аналізу експлуатаційно-технічного стану залізничних колій Київського метрополітену і проведення статистичних досліджень вилучення дефектних рейок із експлуатуємих колій встановлено: по-перше, що найбільша кількість дефектних рейок (до 56,5%) у головних коліях вилучається за дефектом коду 11.2 – 11.1 – викришування металу на боковій робочій викружці головки рейки через недостатню контактну-втомну міцність металу; по-друге визначені графо-аналітичні залежності вилучення рейок по цим дефектам залежно від умов експлуатації.

3. На основі встановлених математично-статистичних залежностей вперше в Україні для колій метрополітенів (на прикладі Київського метрополітену) виконано теоретичне прогнозування нормативного тоннажу вилучення з експлуатації рейок типів Р50 і Р65 по дефектності викришування металу на боковій робочій викружці головки рейки, залежно від умов експлуатації і плану залізничних колій (прямі і криві різних радіусів).

4. Теоретичними розрахунками, з використанням різних розрахункових методик, в тому числі класичної методики розрахунків теорії пружності і сучасної методики математичної фізики – методу кінцевих елементів (МКЕ), визначено напружено-деформований стан рейок типу Р50 в зоні контактної взаємодії колеса і рейки на поверхні кочення головки для експлуатаційних умов Київського метрополітену.

5. Виконані теоретичні дослідження довговічності рейок в зоні контактної взаємодії з колесами з позицій напружено-деформованого стану металу.

Вперше в Україні теоретичними розрахунками обґрунтовано велику вірогідність утворення дефектів контактної-втомного походження в вигляді викришування і вищерблювання металу на поверхні кочення рейки, біля краю головки, в результаті створення високого ступеню напруженого нерівноважного стиску в цій зоні, за рахунок високих значень головних нормальних напружень і появи великих дотичних напружень в тілі головки на глибині 2,5-3,5 мм, які перевищують межу текучості і витривалості металу.

6. Проведені стендові експериментальні випробування дослідних зразків дефектних рейок, вилучених з експлуатації, на багатоциклову витривалість з метою визначення їх залишкового ресурсу, а також випробування на злам при дії граничного вертикального навантаження.

На основі цих випробувань при забезпеченні дефектоскопного контролю визначено величину залишкового ресурсу дефектних рейок типу Р50 (за дефектом 11.2) після виявлення дефектів в колії до їх необхідного вилучення з експлуатації.

7. Випробування зразків рейок на злам при дії граничного вертикального навантаження, при статичному поперечному триточковому вигині показали, що рейки типу Р50 метрополітену відповідають встановленим значенням показників міцності й пластичності.

Результати експерименту показали, що рейки Р50 метрополітену витримали без зламу прикладення вертикальної статичної сили на голівку $P_{\max}=1200$ кН, а на підшву рейки $P_{\max}=800$ кН. Але в реальних умовах експлуатації метрополітену досягти таких навантажень неможливо.

8. Розроблено нові технічні умови на експлуатацію рейок Київського метрополітену типів Р50 і Р65, з визначенням підвищених, в порівнянні з існуючими, нормативних строків їх служби для різних умов експлуатації.

Запропоновані нові нормативні строки служби рейок – підвищені порівняно з раніше діючими на 33,3% для рейок Р50 (600 млн. т брутто замість 450 млн. т брутто) і на 16,7% для рейок Р65 (700 млн. т брутто замість 600 млн. т брутто). Нові нормативні строки служби рейок затверджені в якості діючих на Київському метрополітені з 23.03.2015 р.

9. Розрахована і надана оцінка техніко-економічної ефективності впровадження розроблених в дисертації заходів. Розрахунки показали, що при впровадженні нових підвищених нормативних строків служби рейок типу Р50, які запропоновані для експлуатаційних умов Київського метрополітену на основі наукових досліджень ДЕТУТ за участю дисертаційних досліджень автора, пропускна спроможність рейок безстикової колії збільшиться на 150 млн. т брутто, або на 6 років експлуатації.

Очікуваний економічний ефект по приведеним затратам (що враховують і капітальні вкладення, і експлуатаційні витрати) буде складати 669,4 тис. грн. за рік на кожний 1 км підземних ділянок колії; для наземних ділянок колії економічний ефект за тими ж самими приведеними затратами буде складати 2 млн. 107,9 тис. грн. за рік на кожен 1 км наземних ділянок колії.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні праці:

1. Даніленко Е.І., Йосифович Р.М., Олійник О.А., Сорока О.О. Дослідження впливу динамічних колісних навантажень, вантажонапруженості і швидкостей руху поїздів на міцність, стійкість і строки служби рейок, скріплень на інших елементів

ВБК [Текст] // Збірник наукових праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології», – Вип 22. – К.: ДЕТУТ, 2013. – С. 9-19.

2. Даніленко Е.І., Карпов М.І., Молчанов В.М., Йосифович Р.М. Про необхідність внесення змін в існуючі нормативні допуски по ширині рейкової колії у прямих та кривих при впровадженні швидкісного руху поїздів на залізницях України [Текст] // Науково-практичний журнал «Залізничний транспорт України». – №2. - 2014. – С. 9-17.

3. Твердомед В.М., Йосифович Р.М. Огляд технічних характеристик конструкцій верхньої будови залізничної колії та їхніх умов експлуатації на лініях Київського метрополітену [Текст] // Збірник наук. праць ДЕТУТ: Серія «Транспортні системи і технології». – Вип. 24. – К.:ДЕТУТ, 2014. – С. 70-80.

4. Даніленко Е.І., Молчанов В.М., Йосифович Р.М., Олійник О.А. Про необхідність внесення змін в нормативні допуски по ширині рейкової колії в кривих ділянках зі звичайними швидкостями руху поїздів та при впровадженні швидкісного руху на залізницях України [Текст] // Науково-практичний журнал «Залізничний транспорт України». – № 5. – 2014. – С. 36 – 40.

5. Агарков О.В., Йосифович Р.М. Визначення контактних напружень в рейках типу Р50, які експлуатуються в метрополітені [Текст] // Збірник наукових праць «Наука та прогрес транспорту» Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2015. - №4 (58). – С. 71-86.

6. Технічні умови на експлуатацію рейок на коліях Київського метрополітену / Даніленко Е.І., Карпов М.І., Косарчук В.В., Твердомед В.М., Йосифович Р.М., Бойко В.Д., Молчанов В.М., Агарков О.М. [Текст] // Нормативно-технічне видання. – К.: КП «Київський метрополітен», 2014 р. – 17 с.

7. Молчанов В.М., Йосифович Р.М. Аналіз виходу рейок у дефектні в умовах експлуатації на коліях метрополітену [Електронне видання] // Науково-практичний журнал «Залізничний транспорт України». – 2015. - №6. – С. 21-26.

8. Йосифович Р.М. Дослідження залишкового ресурсу дефектних рейок Р50 з випробуваннями на циклічну витривалість і граничне вертикальне навантаження [Текст] // Збірник наукових праць «Наука та прогрес транспорту» Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2015. - №6 (60). – С. 78-88.

Додаткові праці:

9. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України (ЦП-0269). Нормативно-технічне видання / Даніленко Е.І., Курган М.Б., Карпов М.І., Яковлев В.О., Йосифович Р.М та ін. // К.: Укрзалізниця, 2012. – 456 с.

10. Карпінський С.Л., Йосифович Р.М., Даніленко Е.І. Нові методи виготовлення довгих рейкових плітей для безстикової колії із застосуванням сучасних рейкозварювальних машин [Текст] // Збірник наукових праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології», – Вип 20. – К.: ДЕТУТ, 2012. – С. 63-70.

11. Карпов М.І., Йосифович Р.М. Засоби неруйнівного контролю рейок [Текст] // Навчальний посібник. – К.: ДЕТУТ, 2015. – 174 с.

12. Йосифович Р.М. Дослідження залишкового ресурсу дефектних рейок Р50 з випробуваннями на циклічну витривалість [Текст] // Тези доповіді на Міжнародній

науково-практичній конференції ім. д.т.н. Сокола Е.М. «Безпека руху і наукові засади експертних досліджень транспортних пригод та інженерних споруд». – Львів, 2015. – С. 64-65.

13. Технічні умови на експлуатацію стрілочних переводів на коліях Київського метрополітену [Текст] / Даніленко Е.І., Карпов М.І., Косарчук В.В., Твердомед В.М., Йосифович Р.М., Бойко В.Д., Молчанов В.М., Агарков О.М. // Нормативно-технічне видання. – К.: КП «Київський метрополітен», 2015 р. – 19 с.

АНОТАЦІЯ

Йосифович Р.М. Наукове обґрунтування і практичне вирішення проблеми підвищення експлуатаційного ресурсу рейок Київського метрополітену. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.06 – залізнична колія. Державний економіко-технологічний університет транспорту, МОН України, Київ, 2015.

Дисертація присвячена науковому обґрунтуванню і практичному вирішенню проблеми підвищення експлуатаційного ресурсу рейок Київського метрополітену шляхом додаткового використання залишкового ресурсу рейок з дефектами контактано-втомного походження на поверхні кочення голівки.

Методами математичної статистики встановлена графо-аналітична залежність вилучення рейок з експлуатації за причиною появи контактано-втомних дефектів виду 11.2-11.1 на поверхні кочення головки рейок, від пропущеного тоннажу. Результати статистичних досліджень вилучених з експлуатації дефектних рейок, в залежності від пропущеного тоннажу, дозволили спрогнозувати терміни служби рейок по дефектності. Теоретичними розрахунками, з використанням різних розрахункових методик, в тому числі метода кінцевих елементів (МКЕ), визначено напружено-деформований стан рейок типу Р50 в зоні контактної взаємодії колеса і рейки на поверхні кочення головки для експлуатаційних умов Київського метрополітену.

Проведені стендові експериментальні випробування дослідних зразків дефектних рейок, вилучених з експлуатації, на багатоциклову витривалість з метою визначення їх залишкового ресурсу, а також випробування на злам при дії граничного вертикального навантаження. Результати виконаних стендових лабораторних випробувань дослідних зразків дефектних рейок з дефектами контактано-втомного походження, які були вилучені з експлуатації згідно діючих нормативів, дозволили визначити залишковий ресурс для дефектних рейок типу Р50 для умов експлуатації метрополітену.

На основі виконаних досліджень розроблені нові нормативні терміни служби рейок типів Р50 і Р65 для різних категорій колій для умов Київського метрополітену, нові норми збільшено відносно існуючих відповідно на 33,3% для Р50 і 16,7% для Р65. Нові нормативи затверджені Київським метрополітеном і внесені у нову редакцію «Технічних умов на експлуатацію рейок».

Ключові слова: залізничні рейки, колії метрополітену, ресурс експлуатації, дефекти рейок, поверхня кочення, контактна взаємодія.

АННОТАЦИЯ

Йосифович Р.Н. Научное обоснование и практическое решение проблемы повышения эксплуатационного ресурса рельсов Киевского метрополитена. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.06 – железнодорожный путь. Государственный экономико-технологический университет транспорта, МОН України, Киев, 2015.

Диссертация посвящена научному обоснованию и практическому решению проблемы повышения эксплуатационного ресурса рельсов Киевского метрополитена путем дополнительного использования остаточного ресурса рельсов с дефектами контактно-усталостного происхождения на поверхности катания головки, что обосновано экспериментально-теоретическими исследованиями.

Выполнены статистические исследования выхода рельсов по дефектности при эксплуатации на путях Киевского метрополитена за период 2003-2013 гг. Установлено, что наибольшую долю в образовании дефектов рельсов составляют дефекты выкрашивания кода 11.1-11.2, на боковой рабочей выкружке головки их процент в общей массе дефектов составляет более 56%. Методами математической статистики установлена графическая и аналитическая зависимость изъятия рельсов из эксплуатации по причине появления контактно-усталостных дефектов вида 11.2-11.1, от пропущенного по рельсам тоннажа. Результаты статистических исследований изъятия дефектных рельсов позволили спрогнозировать сроки службы рельсов метрополитена по дефектности.

Теоретическими расчетами, с использованием разных расчетных методик, в том числе метода конечных элементов (МКЭ), определено напряженно-деформированное состояние рельсов типа Р50 в зоне контактного взаимодействия на поверхности катания головки для эксплуатационных условий Киевского метрополитена. Показано, что наибольшие контактные напряжения (нормальные и касательные) возникают при смещении контактной площадки ближе к краю головки рельса. Наибольшие нормальные сжимающие напряжения действуют на поверхности катания, а наибольшие касательные напряжения на глубине 2,3-3,5 мм. При этом и нормальные и касательные, и эквивалентные напряжения во всех зонах взаимодействия превышали допускаемые значения напряжений по условиям длительной выносливости рельсовой стали.

Проведены стендовые экспериментальные испытания опытных образцов дефектных рельсов, изъятых из эксплуатации, на многоцикловую выносливость с целью определения их остаточного ресурса, а также испытания на излом при действии статической предельной вертикальной нагрузки. Результаты выполненных испытаний дефектных рельсов с дефектами контактно-усталостного происхождения, изъятых из эксплуатации согласно действующих на метрополитене нормативов, позволили определить остаточный ресурс для дефектных нетермообработанных рельсов типа Р50 для условий эксплуатации Киевского метрополитена.

На основании выполненных исследований разработаны новые нормативные сроки службы рельсов Р50 и Р65 для разных категорий путей Киевского метрополитена, притом новые нормы увеличены относительно существующих соответственно для рельсов типа Р50 на 33,3% и для рельсов типа Р65 на 16,7%.

Ключевые слова: железнодорожные рельсы, пути метрополитена, ресурс эксплуатации, дефекты рельсов, поверхность катания, контактное взаимодействие.

SUMMARY

Yosifovich R.M. Scientific substantiation and practical decision of the problem of operating resource of rails increase at Kiev's underground. – The manuscript.

Dissertation for the candidate of technical sciences degree on speciality 05.22.06 – Railway track. University of Economy and Technology Transport, Ukraine, Ministry of Education and Science, Kyiv, 2015.

Dissertation is devoted a scientific substantiation and practical decision of the problem of operating resource of rails increase at Kiev's underground by the additional use of remaining resource of rails that have defects of contact fatigue character on rails head surface, that grounded experimentally and theoretical by researches.

The methods of mathematical statistics was established graphic and analytical dependence of exception of rails from exploitation after reason of appearance contact fatigue defects of kind 11.2-11.1 on rail's head surface, from tonnage that the rails fulfilled. The results of statistical researches of the rails, that have defects withdrawn from exploitation, depending from fulfilled tonnage, allowed to make prognosis the terms of service of underground rails depending on defects accumulating.

By theoretical calculations, with the use of different calculation methods, in that number the method of eventual elements (MKE), was established tensely deformed the state of rails as R50 in the area of contact interaction of wheel and rail on rail's of head surface for the operating terms of Kiev's underground.

The stand experimental tests of pre-production models of defected rails on multicycles endurance were made with the purpose of determination of them remaining resource, and also break tests were made with the action of the maximum vertical loading.

Results of the fulfilled tests allowed to define a remaining resource for rails R50 and R65, that have defects of contact fatigue character on rail head surface for operating terms of Kiev's underground.

New norms are increased in relation to existing accordingly on 33,3% and 16,7% for rails R50 and R65/

Key words: railway rails, ways of underground, resource of exploitation, rail defects, surface of rolling, contact interaction.