

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ  
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

**АРБУЗОВ МАКСИМ АНАТОЛІЙОВИЧ**

До друку  
Проректор з наукової роботи  
д.т.н., проф. \_\_\_\_\_ С.В. Мямлін

**УДК 625.14.3.482:658.011.22:536.5**

**ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗА ПОЗДОВЖНІМИ  
НАПРУЖЕННЯМИ В РЕЙКОВИХ ПЛІТЯХ БЕЗСТИКОВОЇ КОЛІЇ**

**Спеціальність 05.22.06 – залізнична колія**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**дисертації на здобуття наукового ступеня**  
**кандидата технічних наук**

**Дніпропетровськ – 2010**

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ  
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

**АРБУЗОВ МАКСИМ АНАТОЛІЙОВИЧ**

**УДК 625.14.3.482:658.011.22:536.5**

**ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗА ПОЗДОВЖНІМИ  
НАПРУЖЕННЯМИ В РЕЙКОВИХ ПЛІТЯХ БЕЗСТИКОВОЇ КОЛІЇ**

**Спеціальність 05.22.06 – залізнична колія**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**дисертації на здобуття наукового ступеня**  
**кандидата технічних наук**

**Дніпропетровськ – 2010**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі «Колія та колійне господарство» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України.

**Науковий керівник** – доктор технічних наук, професор  
***РИБКІН Віктор Васильович***,  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України, професор, завідувач кафедри «Колія та колійне господарство».

**Офіційні опоненти:** – доктор технічних наук, професор  
***КУРГАН Микола Борисович***,  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України, професор, завідувач кафедри «Проектування та будівництво доріг»;

кандидат технічних наук, доцент  
***ШРАМЕНКО Володимир Павлович***,  
Українська державна академія залізничного транспорту  
Міністерства транспорту та зв'язку України, м. Харків, доцент, завідувач кафедри «Колія і колійне господарство».

Захист відбудеться «\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 р. о \_\_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010, ауд. 314

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Автореферат розіслано «\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
д.т.н., професор

***М. О. Костін***

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Вступ.** В умовах інтеграції України до Євросоюзу зростає значення транспортних коридорів Укрзалізниці і залізничного транспорту в цілому. Ефективне функціонування залізничного транспорту є необхідною умовою стабілізації та піднесення економіки нашої держави. Основою залізничного транспорту є колія та колійне господарство. На залізницях України найбільш прогресивною і ефективною конструкцією колії є безстикова, протяжність якої станом на 2008 рік складає 20,6 тис. км, що становить 70% від загальної.

Температурно-напружений тип безстикової колії, що використовується на залізницях України, вимагає постійного контролю за поздовжньо-напруженим станом рейкових плітей. Моніторинг температури та поздовжніх напружень плітей тісно пов'язаний з безпекою руху поїздів та безпекою виконання ремонтних колійних робіт. Сьогодні ці питання потребують удосконалення методів оцінки температурно-напруженого стану рейкових плітей, оскільки щорічно трапляються випадки втрати стійкості безстикової колії.

Завданням даної дисертаційної роботи є розробка нового методу контролю за температурно-напруженим станом рейкових плітей, який шляхом вдосконалення існуючої системи моніторингу підвищить безпеку руху на залізничному транспорті.

**Актуальність теми.** Особливістю роботи безстикової колії є те, що закріплені рейкові пліти при підвищенні або зниженні температури в повній мірі не можуть змінювати свою довжину. Через це в них виникають значні поздовжні температурні сили, які в спекотну літню погоду можуть призвести до втрати стійкості (до викиду) колії, а в холодну зимову – до перенапружень в підшві рейки і зламу її з утворенням небезпечного зазору, або розриву рейкового стику у зрівнювальному прольоті через зріз болтів.

Укладання та закріплення рейкових плітей безстикової колії здійснюється в розрахунковому інтервалі температури. При цьому нейтральна температура, при якій сумарні поздовжні напруження дорівнюють нулю, знаходиться в межах розрахункового інтервалу. Це забезпечує при екстремально низьких та екстремально високих температурах міцність та стійкість безстикової колії. Але під час експлуатації та за рахунок ремонтів безстикової колії відбуваються поздовжні її зміщення, і, як наслідок, нейтральна температура може вийти за межі розрахункового інтервалу, що створює пряму загрозу безпеці руху поїздів через порушення міцності та стійкості колії.

Зараз на залізницях для контролю за поздовжньо напруженим станом рейкових плітей використовують метод «маячних» шпал. Протяжність безстикової колії щорічно збільшується: 2006 рік – 19,7 тис. км, 2007 рік – 20,3 тис. км, 2008 рік – 20,6 тис. км. Кількість «маячних» шпал також росте. Існуючий метод контролю має низку своїх недоліків: можливість зрушення «маячної» шпали під час експлуатації та ремонту колії, переміщення «маячної» шпали в баласті при угоні колії, відсутність контролю напружень, що залишилися в пліті після розрядки, відсутність контролю напружень, що залишилися в пліті після примусового її введення в розрахунковий

температурний інтервал, що, головним чином, призводить до неможливості визначення дійсного значення нейтральної температури.

При щорічному 3% зростанні протяжності безстикової колії, при наявності недоліків в існуючій системі контролю, які впливають на безпеку руху поїздів та безпеку виконання ремонтних колійних робіт, її вдосконалення шляхом впровадження нового методу контролю, за допомогою якого визначаються напруження не лише температурні та напруження від уgonу, але й залишкові, тобто сумарні напруження, є актуальним.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертації пов'язана з планом виконання науково-дослідних робіт кафедри «Колія та колійне господарство» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна в сфері удосконалення технічних норм по укладанню та утриманню безстикової колії. Автор дисертації приймав участь як співвиконавець в науково-дослідній роботі, що виконувалась за завданням Міністерства транспорту та зв'язку України, за темою «Розробка пристрою для вимірювання напружень в плітях безстикової колії» (державний реєстраційний номер 0107U005236), та як співвиконавець у розробці нормативно-технічного документа «Правила з укладання безстикової колії на капітально відремонтованому земляному полотні» ЦП-0188 затвердженого наказом Укрзалізниці від 19.03.2008 р. № 176-Ц.

**Мета роботи.** Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності конструкції безстикової колії, запобігання випадків травматизму працівників при виконанні робіт на ділянках безстикової колії, підвищення безпеки праці та безпеки руху поїздів шляхом вдосконалення системи контролю за температурною роботою рейкових плітей.

#### **Задачі досліджень.**

1. Проведення класифікації та порівняльного аналізу існуючих методів контролю за температурною роботою плітей.
2. Вибір оптимального методу вимірювання механічних напружень.
3. Визначення експериментальним шляхом магнітних властивостей рейкової сталі.
4. Удосконалення та розробка методики вимірювання механічних поздовжніх напружень в плітях безстикової колії.
5. Розробка просторової моделі роботи безстикової колії.
6. Розробка методики вимірювання відхилення температури рейки від її нейтральної температури.
7. Розробка методики вимірювання розподілення нейтральної температури по довжині пліті.

**Об'єкт досліджень** – процес контролю температурно-напруженого стану рейкових плітей безстикової колії.

**Предмет досліджень** – рейкові пліті безстикової залізничної колії.

**Методи досліджень.** Такий теоретичний метод, як метод аналізу ієрархій (MAI), дозволив виконати порівняльний аналіз та вибір оптимального методу вимірювання механічних напружень. На основі емпіричного методу досліджень, визначено магнітні властивості рейкової сталі. Використання

методу комплексного аналізу дало можливість знайти метод визначення механічних напружень без індивідуального калібрування точок вимірювання. Для аналітичних досліджень застосовано методи математичної статистики та енергетичний метод моделювання.

#### ***Наукова новизна одержаних результатів.***

1. Вперше для визначення нейтральної температури рейкової пліті використано магнітний метод, що базується на запропонованій аналітичній залежності між магнітною проникністю рейкової сталі та основними факторами впливу: температурою, механічними напруженнями. На відміну від існуючих методів даний метод дозволяє визначати механічні напруження безпосередньо за характеристиками стану металу рейок.

2. Встановлено закономірності впливу механічних напружень, температури металу, загартованості металу, хімічного складу та напруженості магнітного поля на магнітні властивості рейкової сталі. На основі цього вперше стало можливим не лише визначати, але й прогнозувати коефіцієнт пропорційності між магнітною проникністю рейкової сталі та напруженням.

3. Розроблено математичну просторову модель роботи безстикової колії, яка на відміну від існуючих враховує вплив горизонтальних та вертикальних згинальних моментів, зміну сил опору горизонтальним переміщенням при появі вертикальних переміщень, включає модель розподілення температури по поперечному перетині рейки та модель розподілення внутрішніх поздовжніх напружень по перетині рейки. Це дозволило встановити раціональні місця вимірювання сумарних поздовжніх напружень, розробити методики вимірювання механічних напружень та нейтральної температури в рейкових плітях безстикової колії.

#### ***Практичне значення отриманих результатів.***

1. Досліджено магнітні властивості рейкової сталі, що дозволило розробити та виготовити прилад для визначення нейтральної температури, який включає в себе три вимірювальні блоки: електронний термометр, блок для вимірювання механічних напружень, блок для визначення коефіцієнта пропорційності між механічними напруженнями та температурою.

2. Розроблено просторову модель роботи безстикової колії, що дозволила створити нормативно-технічний документ «Правила з укладання безстикової колії на капітально відремонтованому земляному полотні» ЦП-0188 затвердженого наказом Укрзалізниці від 19.03.2008 р. № 176-Ц.

3. Розроблено методику визначення нейтральної температури, яка дає змогу оперативно встановити фактичну величину відхилення температури рейкової пліті від нейтральної температури, що необхідно робити при роботах пов'язаних з порушенням стійкості безстикової колії.

4. Отримано нові закономірності між відносною магнітною проникністю та такими факторами впливу як механічні напруження та напруженість магнітного поля, що дають можливість прогнозувати коефіцієнт пропорційності між відносною магнітною проникністю та напруженнями.

5. Розроблено прилад для вимірювання нейтральної температури, що дозволяє визначити температурно-напружений стан як будь-якої ділянки, так і

всієї пліті в цілому, та підвищує безпеку руху поїздів та безпеку виконання ремонтно-колійних робіт.

**Особистий внесок здобувача.** Постановку мети і задачі досліджень виконано спільно з науковим керівником. В публікаціях, в яких відображено основні результати дисертації та які написані у співавторстві, автору дисертації належить: у роботі [1] – проведено лабораторний експеримент по визначенню залежності показань приладу від механічних напружень; у роботі [2] – проведено порівняльний аналіз методів контролю за поздовжніми напруженнями в рейкових плітях безстикової колії за допомогою МАІ, і встановлено, що магнітний метод – перспективний для застосування на колії; у роботі [3, 5] – розроблено просторову математичну модель роботи безстикової колії, що виконана енергетичним методом; у роботі [4] – розроблено спосіб визначення нейтральної температури рейкової пліті безстикової колії; у роботі [6] – розроблено пристрій для визначення механічних напружень статичного характеру в рейці.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертації докладалися на: LXVII міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, травень 2007 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблемы механики железнодорожного транспорта. Безопасность движения, динамика, прочность подвижного состава и энергосбережение» (Дніпропетровськ, травень 2008 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Современные проблемы путевого комплекса» (Москва, листопад 2008 р.); у повному об'ємі дисертаційна робота доповідалася на міжкафедральному семінарі кафедр «Колія та колійне господарство» і «Проектування та будівництво доріг» (Дніпропетровськ, грудень 2009 р.), кафедральному семінарі кафедри «Колія та колійне господарство» (Харків, березень 2010 р.).

**Публікації.** Основні положення дисертації опубліковані в 6-ти наукових працях, у тому числі: 4 - у фахових виданнях, 2 - у матеріалах конференцій.

**Структура дисертації.** Дисертація складається зі вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і восьми додатків. Повний обсяг складає 239 сторінок друкованого тексту, в тому числі: 63 рисунки викладено на 58 сторінках, 23 таблиці - на 22 сторінках, список літератури з 103 найменувань займає 10 сторінок, та 8 додатків викладено на 61 сторінці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету й задачі досліджень, відображена наукова новизна результатів, їх практичне значення.

**У першому розділі** проведено історичний огляд розвитку конструкції безстикової колії, систем контролю за її роботою, та основ розрахунку стійкості безстикової колії.

Теорією стійкості безстикової колії в Радянському Союзі займалися К.М. Міщенко, С.П. Першин, Е.М. Бромберг, В.Г. Альбрехт, М.П. Виногоров, О.Я. Коган, С.І. Морозов, М.Ф. Вериги, В.І. Новакович, В.О. Грищенко, в

Україні – Е.І. Даниленко, М.І. Карпов, О.М. Патласов, В.П. Шраменко.

Із закордонних дослідників слід виділити Р. Рубіна – Швеція, А. Мартіне і Р. Леві – Франція, Е. Енгеля – Австрія, Брокмана – Нідерланди, Л. Сакмауера – Чехословаччина, Д. Бартлетта і Д. Туора – Велика Британія, М. Нумата – Японія, Б. Вашархейлі – Угорщина, Г. Мейєра, О. Аммана і К. Грюневальдта – Німеччина та ін.

Однією з головних причин розбіжностей результатів розрахунку різними методами є прагнення авторів теорії роботи безстикової колії створити метод для практиків, в результаті чого кількість вихідних даних різко скорочується і розрахункова схема сильно спрощується. Але очевидно, що раціональнішим буде шлях використання максимальної кількості факторів і параметрів з послідуємим з'ясуванням доцільності їх врахування.

**У другому розділі** розглянуто особливості температурної роботи безстикової колії, проведено класифікацію методів контролю напруженого стану рейкових плітей, проведено порівняльний аналіз методів контролю напруженого стану рейкових плітей, та виконано вибір методу вимірювання механічних напружень необхідного сьогодні.

По принципу дії всі методи контролю напружень рейкових плітей можна поділити на дві основні групи: методи, що визначають напруження по зміні геометричних розмірів рейкової пліті, та методи, що визначають напруження по зміні фізичних властивостей матеріалу рейки. До першої групи входять такі підгрупи як тензометричний, силовиметричний та оптичний методи вимірювання механічних напружень, до другої – ультразвуковий, електрохімічний та магнітний.

Аналізуючи методи контролю напруженого стану рейкових плітей, їх недоліки та переваги, було складено вимоги до необхідного на сьогоднішній день методу контролю. Всі ці вимоги різноманітні і важливі, але одним вимогам потрібно віддати більшу перевагу, іншим меншу. За допомогою методу аналізу ієрархій (МАІ) було встановлено ступінь важливості кожної із вимог, ступінь відповідності методів поставленим вимогам та дано кількісну оцінку розглянутим методам вимірювання поздовжніх напружень. Матриця прийняття рішення показала, що магнітний метод отримав найвищу оцінку, на другому місці знаходиться ультразвуковий метод, третє місце займає існуючий сьогодні на залізницях оптичний метод.

Отже, використання МАІ дає змогу зробити об'єктивний висновок про те, що саме магнітний метод вимірювання напружень в рейкових плітях безстикової колії являється найбільш необхідним, доцільним, перспективним і повинен отримати більш досконалий та глибокий розвиток як в теоретичному, так і в практичному плані.

**Третій розділ** присвячено лабораторному експерименту по визначенню магнітних властивостей рейкової сталі. У даному розділі розроблено методику проведення лабораторного експерименту, проаналізовано отримані результати та виконано комплексні дослідження магнітних властивостей металу рейки.

Метою лабораторного експерименту є визначення магнітних властивостей рейкової сталі та умов використання магнітного методу для

вимірювання механічних напружень в плітях безстикової колії. Для досягнення поставленої мети було визначено ступінь впливу загартування, температури та механічних напружень на магнітні властивості матеріалу рейки.

Об'єктом випробувань являється рейкова сталь. Для встановлення властивостей рейкової сталі було виготовлено та пронумеровано стрижні з матеріалу взятого з голівки (№ 1, 2 та № 3), шийки (№ 4 та № 5), та підшви (№ 6 та № 7) рейки. Стрижні вирізалися із двох рейок типу Р65, що виготовлені на заводі «Азовсталь» та Нижньотагільському металургійному комбінаті, та маркувалися літерами відповідно «А» та «Т». Зразки довжиною 230 мм оброблялися на токарному станку до діаметра 10 мм за технологією, що не допускає перегрів металу. Зразки №1, №2 та №3 вирізалися з глибини від поверхні катання не глибше за 14 мм. Вирізані таким чином стрижні звільнялись від залишкових напружень та утворювали групи загартованої та незагартованої сталі, і групи різних заводів-виробників.

Для визначення магнітних властивостей на дослідний стрижень надівався соленоїд, утворюючи тим самим дросель. Соленоїд приєднувався до приладу UT70A, що вимірював його індуктивність. По формулі (1) визначалася така магнітна характеристика рейкової сталі як відносна магнітна проникність:

$$\mu = \frac{L}{L_0}, \quad (1)$$

де  $L$  – індуктивність соленоїду одітого на дослідний стрижень;  $L_0$  – індуктивність вільного соленоїду.

Загартований метал мають стрижні 1А, 2А, 3А, 1Т, 2Т, 3Т, 4Т, 5Т, 6Т та 7Т, не загартований – 4А, 5А, 6А та 7А. Середнє значення магнітної проникності для загартованого металу складає 6,320, а для незагартованого – 6,505. Середні значення магнітної проникності загартованої частини голівки рейки «Азовсталь» та магнітної проникності голівки об'ємно загартованої рейки Нижньотагільського металургійного комбінату склали відповідно 6,348 та 6,342. Однофакторний дисперсійний аналіз показав, що загартованість металу впливає на магнітну проникність рейкової сталі, при цьому розрахований коефіцієнт Фішера перевищив його табличне значення в 4 рази, а завод-виробник не впливає (розрахований коефіцієнт Фішера виявився близьким до нуля, що менше табличного).

Для визначення впливу температури на магнітні властивості рейкової сталі на дослідні стрижні надівався соленоїд, приєднувався виносний термодатчик приладу DT9208A, і утворена система поміщалася в термокамери. Термокамери здатні змінювати температуру від  $-15^{\circ}\text{C}$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ .

Як видно з графіків, що представлені на рис. 1, магнітна проникність рейкової сталі має прямопропорційну залежність від температури.

Для оцінки впливу температури на магнітні властивості рейкової сталі використано коефіцієнт пропорційності між магнітною проникністю та температурою  $k_t$ . Однофакторний дисперсійний аналіз показав, що незалежно від того, який завод-виробник, та яка ступінь загартованості, температура впливає на магнітні властивості рейкової сталі однаково. Відносна магнітна проникність рейкової сталі при зміні її температури на  $1^{\circ}\text{C}$  змінюється на 0,012.

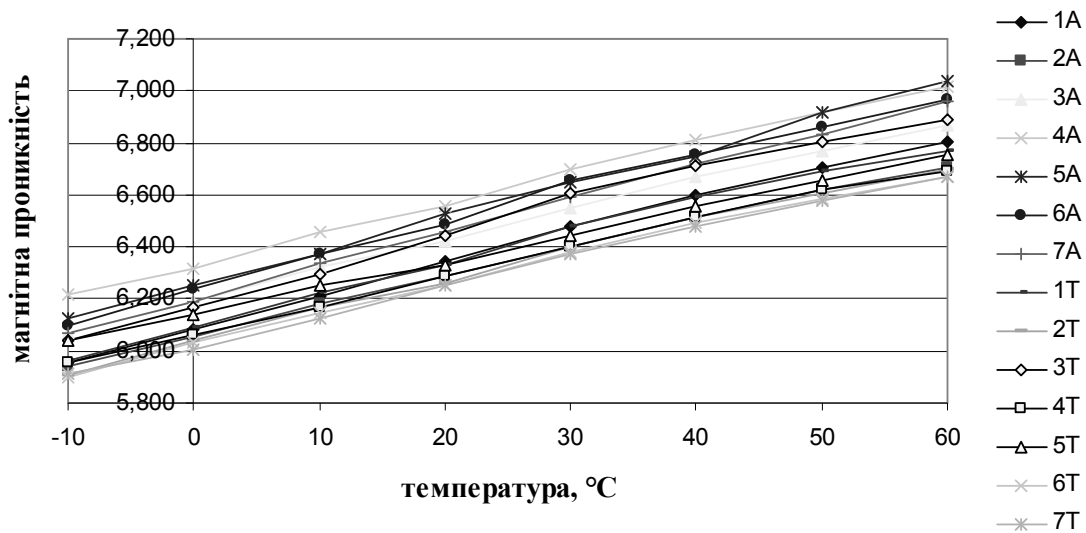


Рис. 1. Залежність відносної магнітної проникності від температури рейкової сталі

Для визначення впливу механічних напружень на магнітні властивості рейкової сталі на дослідні стрижні надівався соленоїд, по кінцям стрижнів за допомогою муфт приєднувалися допоміжні стрижні для захватів преса. Дослідження на розтягання та стискання проводилися окремо. При розтяганні зусилля змінювалося від 0 до 18 кН з кроком 2 кН, при стисканні – від 0 до 10 кН з кроком 2 кН.

На основі отриманих даних побудовано графіки залежності магнітної проникності від поздовжнього зусилля розтягання (рис. 2). Проведено апроксимацію експериментальних даних. Розглядалося два види функцій: прямолінійна та квадратна парабола. Аналізуючи середньоквадратичні похибки можна відмітити, що найменше значення середньоквадратичної похибки для прямої в 1,6 раз менше, ніж для квадратної параболи. Таким чином, магнітна проникність рейкової сталі від механічних напружень має прямолінійну залежність.

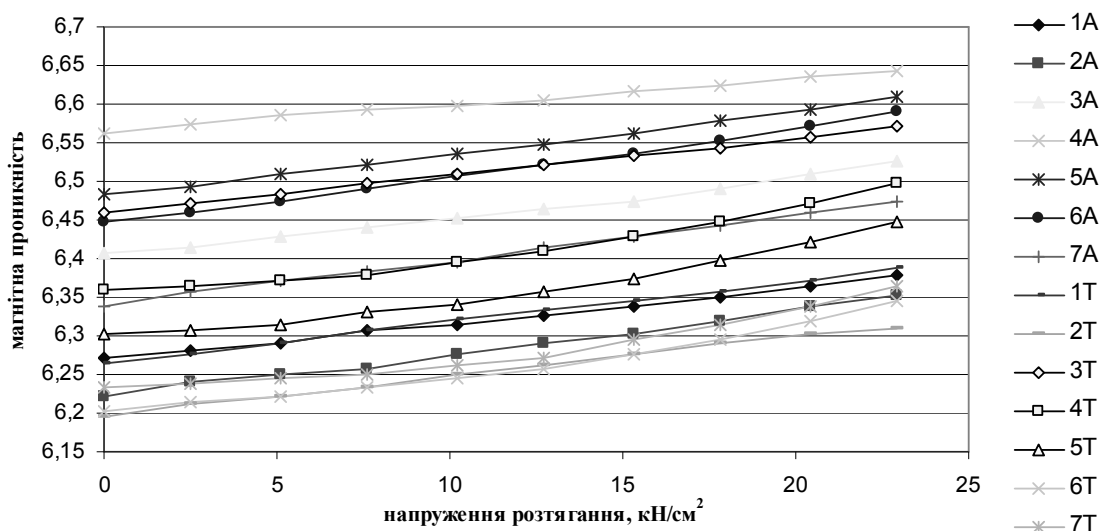


Рис. 2. Залежність відносної магнітної проникності від напружень розтягання при температурі стрижнів +18 °C

Аналіз результатів дослідження впливу стискаючих зусиль показав, що коефіцієнт пропорційності між відносною магнітною проникністю рейкової сталі і напруженнями від знаку напружень не залежить.

Результатом апроксимації прямолінійною залежністю є рівняння прямої (2), що отримане для кожного стрижня.

$$\beta_i^{anp} = A \cdot \alpha_i + B, \quad (2)$$

де  $\alpha_i$  - поточні значення фактору, що впливає на магнітну проникність;  $A$  - коефіцієнти пропорційності між магнітною проникністю та напруженнями;  $B$  - вільний член.

На рис. 3 зображено коефіцієнти пропорційності  $A$  для кожного номеру дослідного стрижня.

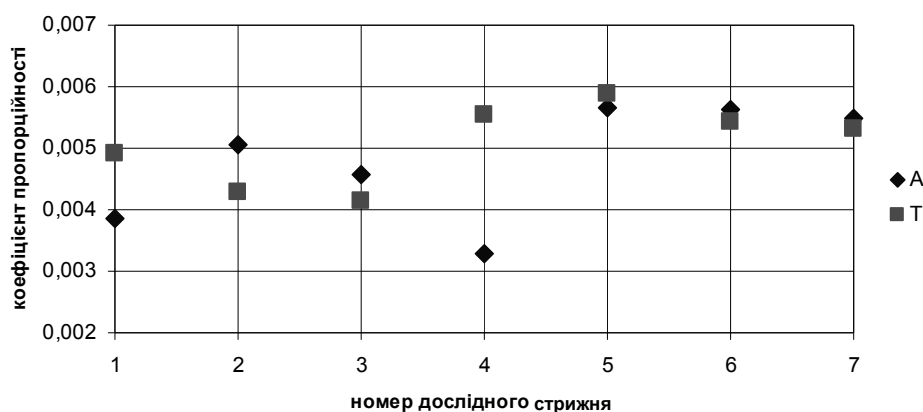


Рис. 3. Коефіцієнти пропорційності між відносною магнітною проникністю і напруженнями для дослідних стрижнів

Аналізуючи дані, які представлені на рис. 3, можна зробити висновок, що коефіцієнт пропорційності між магнітною проникністю і напруженнями для різних дослідних стрижнів різний, і під час експериментів приймав значення від  $0,00329 \text{ см}^2/\kappa\text{Н}$  до  $0,00588 \text{ см}^2/\kappa\text{Н}$ . Так як не просліджується ніяка закономірність між різними дослідними групами стрижнів, то коефіцієнт пропорційності  $A$  не залежить від загартованості рейкової сталі чи заводу виробника.

Таким чином, дослідження магнітних властивостей рейкової сталі на дослідних зразках показали, що магнітна проникність від механічних напружень та температури залежить прямопропорційно. Дану закономірність для будь-якого дослідного стрижня можна відобразити формулою (3)

$$\mu_{t,\sigma} = k_\sigma \cdot \Delta\sigma + k_t \cdot \Delta t + \mu_{t_0,\sigma_0}, \quad (3)$$

де  $k_\sigma$  - коефіцієнт пропорційності між магнітною проникністю та механічними напруженнями;  $\Delta\sigma$  - приріст механічних напружень;  $k_t$  - коефіцієнт пропорційності між магнітною проникністю та температурою;  $\Delta t$  - приріст температури;  $\mu_{t,\sigma}$  - магнітна проникність феромагнітного матеріалу при температурі  $t$  та механічному напруженні  $\sigma$ ,  $\mu_{t_0,\sigma_0}$  - магнітна проникність феромагнітного матеріалу при температурі  $t_0$  та механічному напруженні  $\sigma_0$ .

В лабораторному експерименті кожен дослідний стрижень є відображенням вимірювальної точки в колії, тому для вимірювань в колії за формулою (3) необхідно виконувати калібрування точок вимірювання. Такий принцип вимірювання зараз використовується при методі магнітного шуму Баркгаузена в Угорщині.

Суттєвим недоліком такого вимірювання є велика затрата часу на виконання калібрування точок вимірювання та неможливість визначення напруженого стану пліти в інших точках без індивідуального калібрування.

Для ліквідації недоліків, що являються обмеженням використання магнітного методу, запропоновано наступне.

По-перше, для вимірювання механічних напружень в рейкових плітках безстикової колії використовувати магнітопружні датчики трансформаторного типу, які реагують лише на напруження. При цьому вплив температури відсутній і початковий відлік для будь-якої точки вимірювання дорівнює нулю.

По-друге, на основі встановленого в ході лабораторних досліджень факту, що різні фактори впливу спричиняють однакову зміну магнітних властивостей рейкової сталі, коефіцієнт пропорційності  $k_\sigma$  між магнітною проникністю та механічними напруженнями визначати не через вплив напружень, а через вплив такого фактору як напруженість магнітного поля. При цьому зміна напруженості магнітного поля досягається за рахунок корегування електричних параметрів вимірювальної системи. Таким чином, коефіцієнт пропорційності  $k_\sigma$  визначатиметься швидким вимірюванням за декілька секунд.

В експериментальних дослідженнях корегування електричних параметрів вимірювальної системи досягалося шляхом зміни кількості витків. Результати вимірювань та розрахунків представлені в графічному вигляді на рис. 4.

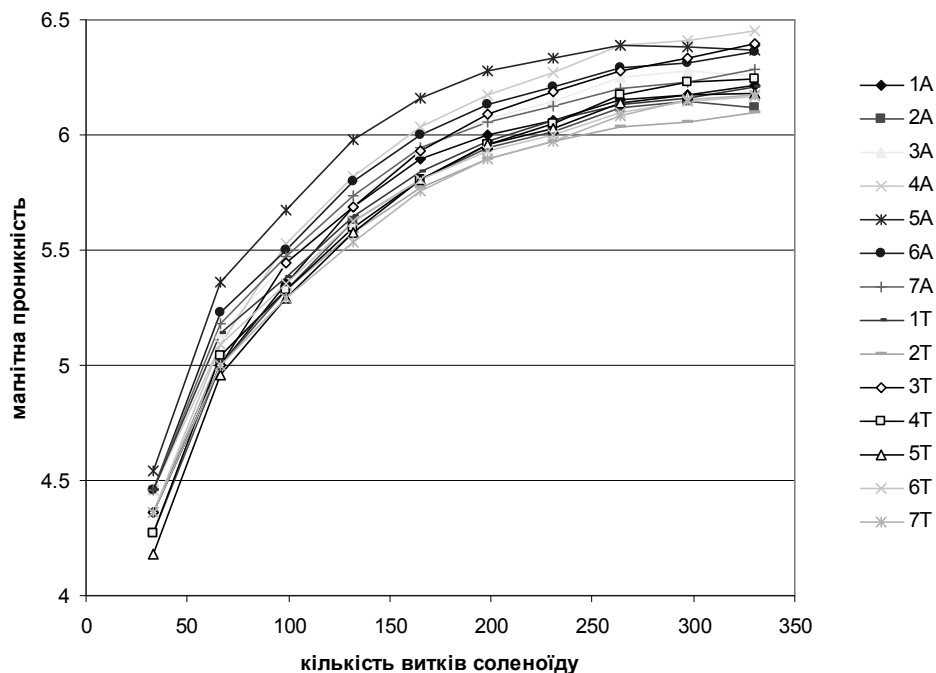


Рис. 4. Залежність відносної магнітної проникності від кількості витків соленоїда

Аналізуючи графіки, зображені на рис. 4, слід відмітити, що вони відрізняються між собою кривизною. Величина кривизни оцінювалась за допомогою приросту ординат, що правомірно на основі математичних положень теорії кривизни функції.

Оцінку кривизни графіків залежності магнітної проникності від кількості витків соленоїда виконано по зоні інтенсивного приросту ординат. В таблицю 1 зведено експериментальні дані по залежності магнітної проникності від кількості витків та визначено приріст ординат  $\Delta\mu$ , що відображає шукану кривизну.

Приріст магнітної проникності  $\Delta\mu$ , що відбувається при зміні кількості витків соленоїду з 33 до 66, на даному відрізку функції відображає коефіцієнт пропорційності між магнітною проникністю та кількістю витків.

Таблиця 1.

Експериментальне визначення приросту відносної магнітної проникності при зміні кількості витків соленоїда з 33 на 66 витків

|             | № зразка |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | 1A       | 2A    | 3A    | 4A    | 5A    | 6A    | 7A    | 1T    | 2T    | 3T    | 4T    | 5T    | 6T    | 7T    |
| $\mu(33)$   | 4,364    | 4,273 | 4,455 | 4,455 | 4,545 | 4,455 | 4,455 | 4,455 | 4,364 | 4,364 | 4,273 | 4,182 | 4,364 | 4,364 |
| $\mu(66)$   | 5,000    | 5,000 | 5,136 | 5,091 | 5,364 | 5,227 | 5,182 | 5,136 | 5,045 | 5,000 | 5,045 | 4,955 | 5,091 | 5,000 |
| $\Delta\mu$ | 0,636    | 0,727 | 0,681 | 0,636 | 0,819 | 0,772 | 0,727 | 0,681 | 0,681 | 0,636 | 0,772 | 0,773 | 0,727 | 0,636 |

По останньому рядку табл. 1 побудовано діаграму приросту магнітної проникності при зміні кількості витків з 33 до 66 (рис. 5).

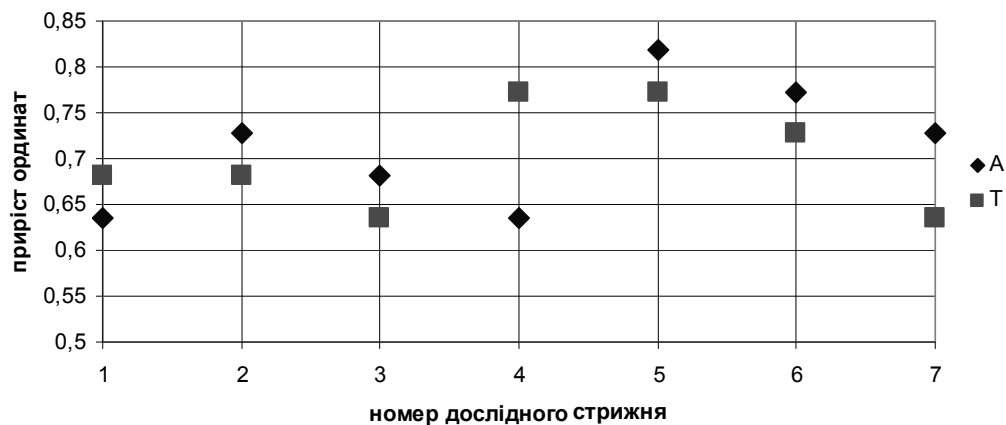


Рис. 5. Приріст магнітної проникності для дослідних стрижнів при зміні кількості витків соленоїда з 33 до 66 по експериментальним даним

З порівняння рис. 3 та рис. 5 спостерігається достатньо висока збіжність у співвідношенні відповідних значень. Це дає можливість, не проводячи калібрування, для будь-яких точок вимірювання визначати індивідуальне значення коефіцієнта пропорційності між магнітною проникністю і

напруженнями  $k_\sigma$  по приросту магнітної проникності  $\Delta\mu$ , що виникає при зміні електричних параметрів вимірювальної системи.

Коли зв'язок між випадковими величинами близький до лінійного, то коефіцієнт кореляції  $r_{ij}$  наближається до 1. Якщо коефіцієнт кореляції дорівнює 1, то нормовані центровані випадкові величини рівні між собою:

$$\frac{k_{\sigma_i} - M[k_\sigma]}{\sigma[k_\sigma]} = \frac{\Delta\mu_i - M[\Delta\mu]}{\sigma[\Delta\mu]}, \quad (4)$$

де  $k_{\sigma_i}$  – коефіцієнт пропорційності між магнітною проникністю та механічними напруженнями для  $i$ -ї точки вимірювання;  $M[k_\sigma]$  – математичне сподівання коефіцієнта пропорційності між магнітною проникністю та механічними напруженнями;  $\sigma[k_\sigma]$  – середнє квадратичне відхилення коефіцієнта пропорційності між магнітною проникністю та механічними напруженнями;  $\Delta\mu_i$  – приріст магнітної проникності для  $i$ -ї точки вимірювання від зміни електричних параметрів вимірювальної схеми;  $M[\Delta\mu]$  – математичне сподівання приросту магнітної проникності від зміни електричних параметрів вимірювальної схеми;  $\sigma[\Delta\mu]$  – середнє квадратичне відхилення приросту магнітної проникності від зміни електричних параметрів вимірювальної схеми.

Враховуючи (4) та вище описані пропозиції, при використанні магнітопружних датчиків трансформаторного типу формула (3) прийме вигляд

$$\mu_\sigma = \left( M[k_\sigma] + \frac{\Delta\mu - M[\Delta\mu]}{\sigma[\Delta\mu]} \cdot \sigma[k_\sigma] \right) \cdot \sigma, \quad (5)$$

де  $M[k_\sigma]$  – математичне сподівання коефіцієнта пропорційності між магнітною проникністю та механічними напруженнями;  $\sigma[k_\sigma]$  – середнє квадратичне відхилення коефіцієнта пропорційності між магнітною проникністю та механічними напруженнями;  $\Delta\mu$  – приріст магнітної проникності від зміни електричних параметрів вимірювальної схеми;  $M[\Delta\mu]$  – математичне сподівання приросту магнітної проникності від зміни електричних параметрів вимірювальної схеми;  $\sigma[\Delta\mu]$  – середнє квадратичне відхилення приросту магнітної проникності від зміни електричних параметрів вимірювальної схеми;  $\sigma$  – механічні напруження.

Таким чином, формула (5) при використанні магнітопружних датчиків трансформаторного типу дозволяє знайти значення магнітної проникності рейкової сталі  $\mu_\sigma$  при певному відомому напруженому стані  $\sigma$ , лише помірявши індивідуальне значення приросту магнітної проникності  $\Delta\mu$  від зміни електричних параметрів вимірювальної схеми.

**У четвертому розділі** створено просторову модель роботи безстикової колії, розроблено методику вимірювання механічних напружень в рейкових плітях безстикової колії.

Модель розподілення внутрішніх поздовжніх напружень по поперечному перетині рейки, вихідними даними для розробки якої були натурні виміри, показала, що місцем вимірювання повинна бути область, де проходить ізолінія нульових напружень, так як внутрішні напруження по поперечному перетині

скомпенсовані. Положення нульової ізоляції з пропущеним тоннажем змінюється. Але відносно стабільним місцем залишається нижня поверхня підшви рейки, що знаходиться на відстані 30–40 мм від кромки, та поверхневий шар бічної грані голівки рейки на глибині 1–2 мм, що знаходиться на відстані 15–25 мм від поверхні катання.

Модель розподілення фактичної температури рейки по її поперечному перетині показала, що для температурних напружень, які по перетину можуть відрізнитись на 15 МПа, місцем вимірювання повинна бути область положення ізоляції середньої температури. Як було встановлено такою областю є бічна поверхня голівки рейки з тіньової сторони.

Глибина проникнення електромагнітного поля зменшується зі збільшенням кругової частоти, магнітної проникності та питомої провідності. Отже, частота напруги живлення датчика повинна бути в межах 1-10 кГц, що забезпечує глибину проникання магнітного поля на 1–2 мм в глибину металу.

Таким чином, місцем вимірювання сумарних поздовжніх напружень повинен бути поверхневий шар бічної грані голівки рейки товщиною до 2 мм, напружений стан якої найбільш близький до напруженого стану поперечного перетину.

По довжині рейкової пліти сумарні поздовжні напруження змінні. На основі натурних вимірів та моделювання температурної роботи безстикової колії було встановлено, що період коливань значення сумарних напружень перетину рейки, які описуються по довжині гармонійною функцією, знаходиться в межах 15–40 м. Тому достатня частота розміщення точок вимірювання напружень по довжині пліти дорівнює половині періоду коливань, що з 50% запасом складає 5 м (8–10 шпальних ящиків).

В залежності від виду виконуваної роботи на безстиковій колії фронт робіт буде різним. Напружений стан ділянки пліти визначається як статистичне середнє значення вимірюваних напружень по довжині даної ділянки. Тому точки вимірювання повинні розміщуватись на однаковій відстані одна від одної, тобто повинні бити рівномірно розподіленими по довжині ділянки. Для статистичних розрахунків мінімальна кількість даних складає біля 10. Тому на фронті робіт повинно бути виконано вимірювання не менше ніж в 10 рівномірно розподілених точках.

Якщо фронт робіт близький до періоду коливань значення сумарних напружень перетину рейки, тобто знаходиться в межах 10–20 м, то вимірювання повинні виконуватися через кожні 1–2 м (2–4 шпальних ящика).

Таким чином, довжина фронту робіт та достатня частота розміщення точок вимірювання визначають їхню кількість на ділянці пліти: кількість точок вимірювання рівномірно розподілених по довжині фронту робіт повинна бути не менше 10 з відстанню між ними не більше 5 м.

Механічне напруження в точці вимірювання виразимо із закону залежності магнітної проникності рейкової сталі від механічних напружень (5):

$$\sigma = \frac{\mu_{\sigma}}{M[k_{\sigma}] + \frac{\Delta\mu - M[\Delta\mu]}{\sigma[\Delta\mu]} \cdot \sigma[k_{\sigma}]} \quad (6)$$

Прилади, побудовані на магнітопружних датчиках, можуть відображати не безпосередньо магнітну проникність  $\mu$ , а величину пропорційну їй  $V$ . Тоді для використання формули (6) всі її складові необхідно дослідним шляхом визначити для параметру  $V$ .

За результатами лабораторного експерименту було встановлено, що коефіцієнт кореляції між  $k_\sigma$  та  $\Delta\mu$  рівний 0,80. Тому при необхідності виконання високоточних вимірювань  $k_\sigma$  необхідно визначати не через статистичні величини, а шляхом безпосереднього вимірювання. При цьому необхідно знайти відношення приросту показань приладу до приросту механічних напружень. Для температурно нерухомої частини пліті приріст механічних напружень можна знайти через приріст температури. Для температурно рухомої частини необхідно встановлювати навантажувальний пристрій (поздовжній домкрат). Тоді напруження в температурно нерухомій частині пліті буде визначатися за формулою

$$\sigma = \frac{V}{V_1 - V_2} \cdot E\alpha(t_2 - t_1), \quad (7)$$

де  $\sigma$  – механічне напруження;  $V$  – показання приладу, що відповідає напруженню  $\sigma$ ;  $t_1$  – температура рейки при вимірюванні №1;  $t_2$  – температура рейки при вимірюванні №2;  $V_1$  – показання приладу, що відповідає температурі  $t_1$ ;  $V_2$  – показання приладу, що відповідає температурі  $t_2$ ;  $\alpha$  – коефіцієнт температурного подовження ( $\alpha = 11,8 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ );  $E$  – модуль пружності ( $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ).

Таким чином, при використанні магнітопружного датчика трансформаторного типу маємо два способи вимірювання механічних напружень. Перевага способу, який базується на формулі (6) в тому, що він дозволяє в будь-якій точці пліті за декілька секунд визначити напруження, а перевага способу, який базується на формулі (7) – вища точність.

**У п'ятому розділі** розроблено методику вимірювання нейтральної температури, розглянуто особливості вимірювання температури рейки та відхилення температури рейки від нейтральної.

Нейтральна температура для перетину рейкової пліті – це така середня температура рейки по поперечному перетині, при якій сумарна поздовжня сила по поперечному перетині дорівнює нулю.

Нейтральна температура для ділянки пліті визначається інтегрально, як середнє значення нейтральної температури перетину рейки по довжині пліті.

Встановлено, що за сонячної погоди місцем вимірювання температури рейки на її поверхні має бути бічна поверхня голівки рейки з тіньової сторони.

Введено поняття «еквівалентний інтервал температури», під яким розуміється така зміна температури середньої частини пліті, що викликає напруження такої ж величини, як і дія зовнішніх механічних сил:

$$\Delta t_{p-0} = \frac{\sigma}{E \cdot \alpha}, \quad (8)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт температурного подовження ( $\alpha = 11,8 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ );  $E$  – модуль пружності ( $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ );  $\sigma$  – сумарні напруження перетину рейки.

Таким чином, за допомогою приладу для вимірювання сумарних напружень, лише змінивши шкалу приладу, можна вимірювати відхилення температури рейки від її нейтральної температури.

Для знаходження нейтральної температури перетину пліті  $T_{0n}$  необхідно знайти алгебраїчну суму середньої температури по поперечному перетині  $\bar{t}_p$  та відхилення даної температури від нейтральної  $\Delta t_{p-0}$ :

$$T_{0n} = \bar{t}_p + \Delta t_{p-0}, \quad (9)$$

де  $\bar{t}_p$  – середнє значення по перетину фактичної температури рейки, при додатній температурі (+), при від’ємній (–), °C;  $\Delta t_{p-0}$  – відхилення температури перетину пліті від нейтральної температури, при розтягнутому напруженому стані (+), при стисненому напруженому стані (–), °C.

Таким чином, для визначення нейтральної температури перетину пліті необхідно визначити сумарні напруження, за формулою (8) визначити відхилення температури рейки від нейтральної температури, виміряти температуру рейки на бічній поверхні голівки, та за формулою (9) визначити нейтральну температуру.

**У шостому розділі** представлено натурний експеримент по визначенню нейтральної температури рейкової пліті.

Під час виконання експерименту використовувалися такі прилади: електронний термометр, прилад для вимірювання механічних напружень, прилад для вимірювання інтенсивності зміни магнітних властивостей рейкової сталі. Останній прилад UT70A здатен вимірювати індуктивність  $L$ , що пропорційна до магнітної проникності  $\mu$ . Тому замість приросту магнітної проникності  $\Delta\mu$  вимірювався приріст індуктивності  $\Delta L$ .

Нейтральна температура перетину рейки  $T_{0n}$  визначається за формулою (9). Відхилення температури перетину пліті від нейтральної температури  $\Delta t_{p-0}$  визначається за формулою (8). Сумарні напруження перетину рейки  $\sigma$  визначаються двома методами: з використанням статистичних параметрів (6) та без використання статистичних параметрів (7).

Отже, нейтральна температура визначається за двома методами. При методі, що не використовує статистичні параметри, формула (9) прийме вид

$$T_0 = \bar{t}_p + \frac{V}{V_1 - V_2} (t_2 - t_1), \quad (10)$$

При методі, що використовує статистичні параметри нейтральна температура визначається як

$$T_0 = \bar{t}_p + \frac{V}{M[k] + \frac{\Delta L - M[\Delta L]}{\sigma[\Delta L]} \cdot \sigma[k]}, \quad (11)$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності між показаннями приладу, що вимірює механічні напруження в температурно нерухомій частині пліті, та температурою, взятий з протилежним знаком, який визначається за формулою

$$k = \frac{V_1 - V_2}{t_2 - t_1}. \quad (12)$$

За даними натурних вимірювань, що виконувались через кожні 12,5 м, побудовано графік розподілу нейтральної температури пліті, яка визначена магнітним методом без використання статистичних розрахунків (рис. 6).

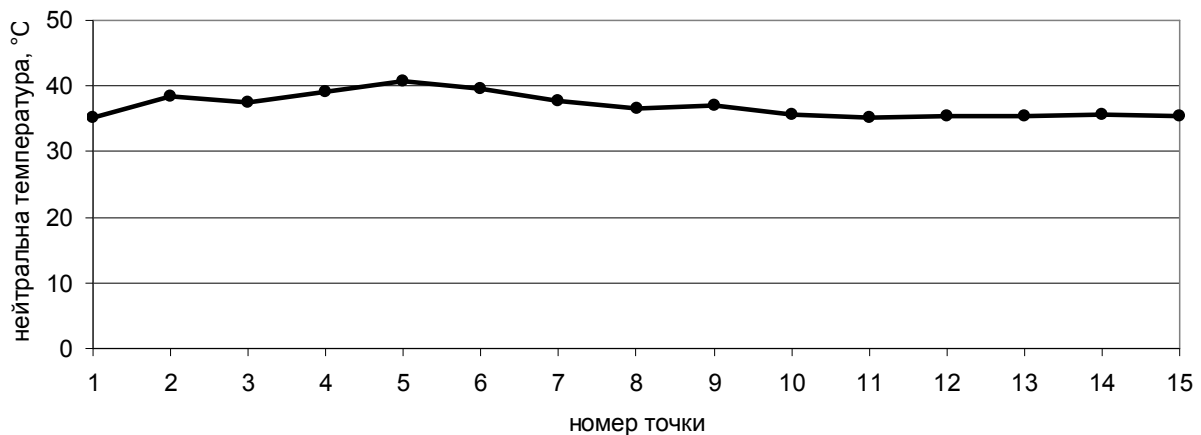


Рис. 6. Розподілення нейтральної температури вздовж пліті.

Графік розподілу нейтральної температури пліті, що визначена магнітним методом з використанням статистичних розрахунків представлено на рис. 7.

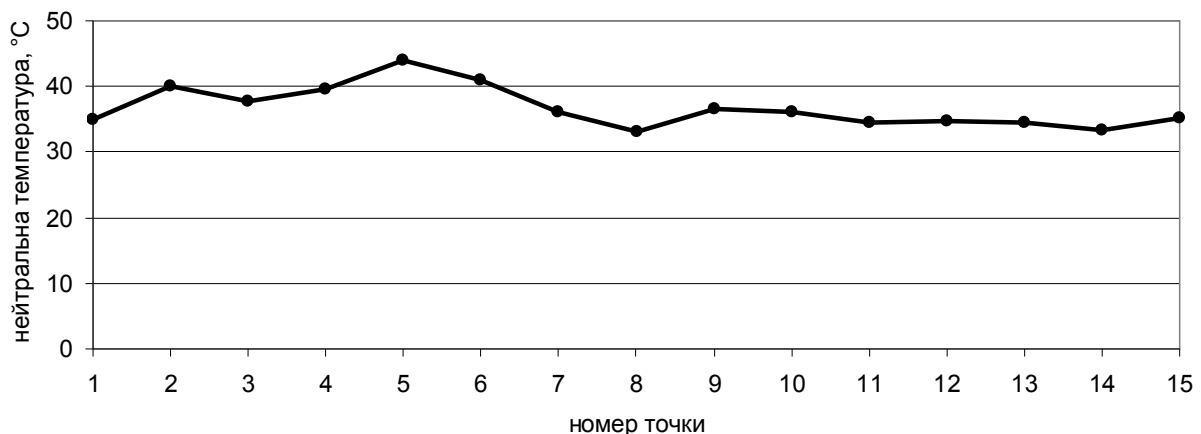


Рис. 7. Розподілення нейтральної температури вздовж пліті.

Таким чином, результати натурального експерименту показують, що нейтральна температура розподілена по довжині рейкової пліті нерівномірно. Для дослідної ділянки пліті нейтральна температура, що визначалася за формулою (10) і представлена на рис. 6, склала 37,0°C. Нейтральна температура, що визначалася за формулою (11) і представлена на рис. 7, склала 36,8°C.

*У цьому розділі* розглянута система контролю за температурною роботою плітей при впровадженні магнітного методу.

Впровадження магнітного методу головним чином вносить в існуючу систему контролю обов'язкове визначення розподілення нейтральної температури ділянки пліті, на якій планується проведення колійних робіт, що пов'язані з послабленням стійкості рейко-шпальної решітки, та обов'язкове визначення розподілення нейтральної температури плітей при весняних та осінніх оглядах, що підвищує якість контролю за температурною роботою плітей.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача вдосконалення системи контролю за поздовжніми напруженнями в рейкових плітях безстикової колії із застосуванням магнітного методу. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації дисертації полягають у наступному.

1. Аналіз існуючих методів контролю температурно-напруженого стану рейкових плітей, який був проведений за МАІ, показав, що метод «маячних» шпал, який зараз використовують на залізницях України не забезпечує достатню точність та надійність оцінки поздовжніх механічних напружень та нейтральної температури плітей, отримав оцінку 0,389 балів. Магнітний метод, що дозволяє вимірювати напруження не лише температурні, та від уgonу, а й залишкові, отримав найвищу оцінку 0,828 балів, і повинен отримати досконалий та глибокий розвиток як в теоретичному, так і в практичному плані.

2. Середнє значення відносної магнітної проникності для загартованого металу рейкової сталі складає 6,320, для незагартованого – 6,505. Середні значення відносної магнітної проникності загартованої частини голівки рейки «Азовсталь» та магнітної проникності голівки об'ємно загартованої рейки Нижньотагільського металургійного комбінату склали відповідно 6,348 та 6,342. Згідно з результатами однофакторного дисперсійного аналізу на відносну магнітну проникність рейкової сталі загартованість металу впливає, при цьому розрахований коефіцієнт Фішера  $F_p=15,4$  перевищив його табличне значення в 4 рази, а завод-виробник не впливає ( $F_p \approx 0$ ).

3. Незалежно від того, який завод-виробник та яка ступінь загартованості рейкової сталі, температура впливає на відносну магнітну проникність рейкової сталі однаково, при цьому розрахований коефіцієнт Фішера склав відповідно  $F_p=2,4$  та  $F_p=2,8$ , що менше за табличне значення в 1,6 та в 1,4 рази. Залежність відносної магнітної проникності рейкової сталі від температури металу прямолінійна, при цьому приріст відносної магнітної проникності рейкової сталі при зміні її температури на  $1^\circ\text{C}$  складає 0,012.

4. Процес зміни відносної магнітної проникності рейкової сталі від поздовжніх механічних напружень описується прямолінійним законом, при цьому середньоквадратична похибка в 1,6 раз менше, ніж для квадратної параболи. Незалежно від заводу-виробника та ступені загартованості коефіцієнт пропорційності між відотною магнітною проникністю рейкової сталі і механічними напруженнями приймав значення від  $0,00329 \text{ см}^2/\text{кН}$  до  $0,00588 \text{ см}^2/\text{кН}$ , але для кожного окремого стрижня для умов розтягання та стискання він однаковий.

5. Різні фактори впливу спричиняють одну й ту ж саму зміну магнітних властивостей, тому коефіцієнт пропорційності між відотною магнітною проникністю рейкової сталі і напруженням  $k_\sigma$ , який раніше не піддавався прогнозуванню, стало можливим визначати через приріст відносної магнітної проникності  $\Delta\mu$  від впливу такого фактору як напруженість магнітного поля. Коефіцієнт кореляції між  $k_\sigma$  та  $\Delta\mu$  за результатами експерименту склав 0,80. Це

дало можливість вивести аналітичну залежність та створити метод для вимірювання механічних напружень без індивідуального калібрування точок, що дозволяє виконувати вимірювання в будь-якій точці і в будь-який час.

6. Розроблена просторова модель роботи плітей безстикової колії дала можливість встановити наступне: місцем вимірювання механічних поздовжніх напружень повинна бути нижня поверхня підшви рейки, що знаходиться на відстані 30–40 мм від кромки, та поверхневий шар бічної грані голівки рейки на глибині 1–2 мм, що знаходиться на відстані 15–25 мм від поверхні катання; місцем вимірювання температури повинна бути верхня сторона підшви рейки ближча до шийки з тіньової сторони, ближча до кромки з сонячної сторони, нижня сторона підшви рейки із сонячної сторони, та бічна поверхня голівки рейки з тіньової сторони; частота напруги живлення магнітопружного датчика повинна бути в межах 1-10 кГц, що забезпечує глибину проникання магнітного поля на 1–2 мм в глибину металу; кількість точок вимірювання рівномірно розподілених по довжині пліті повинна бути не менше 10 з відстанню між ними не більше 5 м.

7. Розроблені та випробувані в натурних умовах методи визначення нейтральної температури. Перший метод - метод визначення нейтральної температури по двох вимірах при різних фактичних температурах рейки - дає надійні значення тому, що при впливові на результати вимірювань неврахованих постійних факторів різниця показань приладу їх виключає. При різниці фактичних температур не менше 17°C точність вимірювання менше 5%. Другий метод - метод визначення нейтральної температури, що використовує статистичні параметри для прогнозування коефіцієнта пропорційності між механічними напруженнями та тактичною температурою - більш швидкий, так як виконує вимірювання лише при одному значенні фактичної температури рейки. Даний метод, на відміну від першого, дозволяє виконувати вимірювання в температурно рухомих частинах пліті, але точність вимірювання не стабільна, не піддається контролю, і похибка вимірювання може досягати 10% і більше. Для практичного застосування доцільно використовувати метод визначення нейтральної температури по двох вимірах при різних фактичних температурах рейки.

***Основні положення та результати дисертації опубліковано у таких роботах:***

- 1 Рибкін В.В. Вимірювання нейтральної температури рейкової пліті безстикової колії / Рибкін В.В., Арбузов М.А. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. Випуск 9 – Д., 2005. - С. 72–76.
- 2 Рибкін В.В. Порівняльний аналіз методів контролю за поздовжніми напруженнями в рейкових плітях безстикової колії / Рибкін В.В., Арбузов М.А. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. Випуск 17 – Д., 2007. - С. 107–109.
- 3 Рибкін В.В. Вимірювання механічних напружень в рейкових плітях безстикової колії магнітним методом / Рибкін В.В., Арбузов М.А. // Вісник

Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. Випуск 24 – Д., 2008. - С. 91–93.

- 4 Пат. № UA 28070. МПК<sup>7</sup>: G 01 L 1/12. Спосіб визначення нейтральної температури рейкової пліті безстикової колії / Рибкін В.В., Арбузов М.А. // 26.11.2007. Бюл. № 19

### *Додаткові праці:*

- 5 Правила з укладання безстикової колії на капітально відремонтованому земляному полотні: ЦП–0188.: затверджено наказом Укрзалізниці від 19.03.2008 р. № 176–Ц. – К., 2008. – 16 с.
- 6 Рибкін В.В. Порівняльний аналіз методів контролю за поздовжніми напруженнями в рейкових плітях безстикової колії / Рибкін В.В., Арбузов М.А. // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: Тези доповідей 67 Міжнародної науково-практичної конференції. – Д.: ДІТ, 2007. – С. 176.

### **АНОТАЦІЯ**

Арбузов М.А. Вдосконалення системи контролю за поздовжніми напруженнями в рейкових плітях безстикової колії. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.06 – залізнична колія, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2010.

Дисертація присвячена вдосконаленню системи контролю за температурно-напруженим станом рейкових плітей безстикової колії шляхом впровадження магнітного методу вимірювання поздовжніх механічних напружень.

Виконано аналіз різних методів вимірювання механічних напружень та проведено комплексну оцінку щодо їх застосування у вимірюванні сумарних напружень рейкових плітей безстикової колії. Встановлено, що магнітний метод являється перспективним методом контролю.

Встановлено характер впливу механічних напружень, температури металу, загартованості металу, хімічного складу та напруженості магнітного поля на магнітні властивості рейкової сталі. На основі цього стало можливим не лише визначати, але й прогнозувати коефіцієнт пропорційності між відносною магнітною проникністю рейкової сталі та напруженням.

Розроблено математичну просторову модель роботи безстикової колії, яка дозволила в дисертації встановити раціональні місця вимірювання сумарних поздовжніх напружень, розробити методику вимірювання механічних напружень та методику вимірювання нейтральної температури в рейкових плітях безстикової колії.

Отримані теоретичні й практичні результати використано в розробці приладу для вимірювання нейтральної температури рейкових плітей.

**Ключові слова:** безстикова колія, рейкова пліть, поздовжні напруження, контроль, нейтральна температура, магнітопружний датчик, прилад.

## АННОТАЦИЯ

Арбузов М.А. Усовершенствование системы контроля за продольными напряжениями в рельсовых плетях бесстыкового пути. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.06 – железнодорожный путь, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2010.

Диссертация посвящена усовершенствованию системы контроля за температурно-напряженным состоянием рельсовых плетей бесстыкового пути путем внедрения магнитного метода измерения продольных механических напряжений.

Температурно-напряженный тип бесстыкового пути, который используется сейчас на железных дорогах Украины, требует постоянного контроля за продольно-напряженным состоянием рельсовых плетей. Мониторинг температуры и продольных напряжений плетей напрямую связан с безопасностью движения поездов и безопасностью выполнения ремонтных путевых работ. Сегодня на железных дорогах используют метод «маячных» шпал. Существующий метод не обеспечивает необходимую надежность и точность контроля, так как имеет целый ряд недостатков: возможность смещения «маячной» шпалы во время эксплуатации и ремонтов пути, перемещение «маячной» шпалы в балласте при уgone пути, отсутствие контроля остаточных напряжений от принудительного ввода плети в расчетный температурный интервал, что, главным образом, приводит к невозможности точного определения нейтральной температуры.

На основе выполненного анализа различных методов измерения механических напряжений и комплексной их оценки в измерении суммарных напряжений рельсовых плетей бесстыкового пути установлено, что магнитный метод имеет преимущества по точности и надежности измерения напряжений.

По результатам экспериментальных исследований было установлено, что на магнитные свойства рельсовой стали влияет закалка стали. Влияние отклонений в химическом составе рельсовой стали разных заводов-изготовителей отсутствует.

Установлено, что температура одинаково воздействует как на закаленную рельсовую сталь, так и на незакаленную. Зависимость относительной магнитной проницаемости рельсовой стали от температуры металла прямолинейна.

Зависимость относительной магнитной проницаемости от механических напряжений прямолинейна. Для разных экспериментальных стержней, которые изготовлены из рельсовой стали, коэффициенты пропорциональности между относительной магнитной проницаемостью и продольными механическими напряжениями разные, и не зависят от завода-изготовителя, или закалки. Но для каждого отдельного стержня для условий растяжения и сжатия они одинаковы.

Разработан магнитный метод и сконструирован прибор для измерения механических напряжений в рельсовых плетях бесстыкового пути.

Измерительный прибор основан на магнитоупругом датчике трансформаторного типа, что способен различать напряжения сжатия и напряжений растяжения. При отсутствии напряжений, не зависимо от температуры рельсовой стали, прибор выдает нулевые показания. Индивидуальный коэффициент пропорциональности между относительной магнитной проницаемостью и продольными механическими напряжениями определяется путем двух измерений при разных температурах.

В ходе комплексных исследований магнитных свойств рельсовой стали было установлено, что разные факторы влияния обуславливают одно и то же изменение магнитных свойств. Поэтому коэффициент пропорциональности между относительной магнитной проницаемостью рельсовой стали и механическими напряжениями, который ранее не поддавался прогнозированию, стало возможным определять через влияние такого фактора как напряженность магнитного поля.

Разработан метод измерения механических напряжений без индивидуальной калибровки точек измерения, что дает возможность выполнять измерения в любой точке плети и в любое время суток. Для осуществления данного метода сконструирован прибор для измерения интенсивности изменения относительной магнитной проницаемости от изменения напряженности магнитного поля.

Для определения нейтральной температуры рельсовой плети применен магнитный метод, который основан на экспериментально полученной аналитической зависимости между относительной магнитной проницаемостью рельсовой стали и основными факторами влияния: температурой и механическими напряжениями. Магнитный метод позволяет определять нейтральную температуру с учетом суммарных продольных напряжений непосредственно по характеристикам состояния металла рельсов.

По поперечному сечению остаточные продольные механические напряжения от изготовления рельса различны по знаку, соизмеримы с напряжениями от воздействия колес подвижного состава и изменяются с пропущенным тоннажем. Эти напряжения суммарно по площади сечения уравниваются, но для измерений имеют существенное влияние. На основе пространственного моделирования распределения остаточных продольных напряжений по поперечному сечению рельса решена важная задача по нахождению рационального места измерения суммарных продольных напряжений. Напряженное состояние поверхностного слоя середины боковой части головки рельса совпадает с суммарным напряженным состоянием поперечного сечения.

Продольные механические напряжения от изготовления рельса суммарно по площади сечения уравниваются, но образуют горизонтальные и вертикальные изгибающие моменты, влияние которых на устойчивость бесстыкового пути незначительно, и ими можно пренебречь.

Разработана математическая пространственная модель работы бесстыкового пути, которая учитывает воздействие горизонтальных и вертикальных изгибающих моментов, учитывает изменение сил сопротивления

горизонтальным перемещениям при появлении вертикальных перемещений, включает модель распределения температуры по поперечному сечению рельса и модель распределения внутренних продольных напряжений по сечению рельса.

На основе пространственного моделирования и проведенных лабораторных и натурных исследований разработан и изготовлен прибор для определения нейтральной температуры и отклонения фактической температуры рельсовой плети от нейтральной температуры.

**Ключевые слова:** бесстыковый путь, рельсовая плеть, продольные напряжения, контроль, нейтральная температура, магнитоупругий датчик, прибор.

### ANNOTATION

Arbuzov M. Improvement of the monitoring system of the longitudinal stress in long welded rails. – Manuscript.

Thesis for candidate degree of Technical Sciences, specialty 05.22.06. – "Railway Track". - Dnepropetrovsk National University of railway transport named after Academician V. Lazaryan. – Dnepropetrovsk, 2010.

The analysis of various methods of measurement of mechanical stress has been executed. It has been established, that the magnetic method is a perspective quality monitoring. The degree of influence of mechanical stress, temperatures of metal, training of metal, a chemical compound and intensity of a magnetic field is experimentally established on magnetic properties of rail steel. Factor of proportionality between magnetic permeability of rail steel and a stress became possible not only to determine, but also to predict. The magnetic method is applied for definition of neutral temperature of long welded rails. The device for definition of neutral temperature is developed and made on the basis of laboratory researches of magnetic properties of rail steel. The mathematical spatial model of work long welded track is developed. This model takes into account influence of the horizontal and vertical bending moments, change of forces of resistance to horizontal moving at occurrence of vertical moving takes into account, the model of distribution of temperature on cross-section section of a rail and on section of a rail includes model of distribution of internal longitudinal stress. Places of measurement of total longitudinal stress are determined with the help of this spatial model. The technique of measurement of mechanical stress and a technique of measurement of neutral temperature in long welded rails is developed.

**Keywords:** long welded track, long welded rails, longitudinal stress, the control, neutral temperature, the gauge of magnetic elasticity, the device.

АРБУЗОВ МАКСИМ АНАТОЛІЙОВИЧ

**ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗА ПОЗДОВЖНИМИ  
НАПРУЖЕННЯМИ В РЕЙКОВИХ ПЛІТЯХ БЕЗСТИКОВОЇ КОЛІЇ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Формат паперу 60x48 1/16. Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 1,0.  
Зам. № \_\_\_\_\_. Тираж 100.

Видавництво Дніпропетровського національного університету залізничного  
транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Свідоцтво суб'єкта видавничої діяльності ДК № 1315 від 31.03.2003

Адреса видавництва та дільниці оперативної поліграфії:  
вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, 49010  
[www.diitrvv.dp.ua](http://www.diitrvv.dp.ua)