

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 620.178:625.143

Установка для дослідження контактної міцності пари колесо–рейка з урахуванням дії експлуатаційних чинників

Л. С. Новогрудський, Ю. Д. Скрипник, В. О. Стрижало, М. Я. Оправхата

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

Описано установку для дослідження зони контактної взаємодії між фрагментами реальних коліс та рейками в умовах, що відповідають умовам їх експлуатації на електрифікованих залізничних коліях.

Ключові слова: фрагменти колеса-рейки, зона контакту, дослідницька установка, електричний струм, контактна взаємодія.

Вступ. Одним із головних напрямків розвитку залізничного транспорту є проведення технічної і технологічної модернізації рухомого складу і залізничної колії з метою підвищення швидкості руху пасажирських та вантажних поїздів. При вирішенні цієї задачі суттєву увагу необхідно приділити процесам у зоні контакту колеса з рейкою. Як відомо [1], взаємодія між залізничною колією і рухомим складом (у системі колесо–рейка) зумовлює комплексні фундаментальні проблеми залізничного транспорту, що впливають як на безпеку руху поїздів, так і на технологію й організацію цього руху та на економіку галузі. Робота системи колесо–рейка залежить від багатьох конструктивних, технологічних і експлуатаційних чинників, інтегральна дія яких призводить до різних пошкоджень коліс і рейок, опис і систематизацію яких широко представлено в літературних джерелах, зокрема в [2–6].

Відомі експериментальні стенди для дослідження системи колесо–рейка умовно можна розділити на такі типи: дослідна ділянка залізничної колії, на якій випробовуються натурні зразки рухомого складу і рейкової колії [7]; дослідні стенди, де натурною є колісна пара, а рейки імітують кільцями відповідного профілю [8] та відносно малогабаритні стенди для випробувань зразків, вирізаних із натурних коліс і рейок [9]. Аналіз взаємодії елементів, які ототожнюють систему колесо–рейка, при використанні цих стендів показує, що в усіх трьох випадках дослідження основної проблемної зони (контакт колеса з рейкою) викликає труднощі. При дослідженнях на стендах перших двох типів ця зона розповсюджується на великі відстані. Разом із тим при дослідженнях на описаному у [8] стенді вона ще й скривлюється внаслідок імітації рейкової колії. При випробуваннях на малогабаритних стендах контактна зона спотворена внаслідок невідповідності геометрії вирізаних зразків до реальних елементів. Окрім того, стенди другого і третього типів не реалізують режими роботи, що відповідають експлуатаційним. Зокрема, рейка не піддається, як на практиці, згину, неможливо реалізувати поздовжні та поперечні проковзування колеса відносно рейки, дослідити вплив електричного струму тощо. Отже, дослідити з високою достовірністю за допомогою вказаних стендів зародження і розвиток пошкоджень у зоні контакту колеса з рейкою та вплив на цей процес зовнішніх чинників досить складно.

Постановка задачі. Метою даної роботи є створення експериментального стенду, що дозволить відтворити зону взаємодії пари колесо–рейка невеликої довжини (4-5 довжин зони контакту при максимальному статичному навантаженні) та вивчити зародження й розвиток пошкоджень у процесі циклічного напручування за умов кліматичних температур і дії електричного струму. Як зразки необхідно використовувати фрагменти натурних рейок та бандажів колеса зі збереженням реальної геометрії їх поверхонь взаємодії (згідно з ДСТУ 3717-98, ГОСТ 52366-2005, ГОСТ 8161-75). Система навантажування експериментальних стендів повинна відтворювати рівень та характер навантажень, які відповідають експлуатаційним. На практиці зусилля від колісних пар на рейки передаються по площадках, що виникають у результаті пружно-пластичного деформування металу контактуючих тіл. У типовому випадку при навантаженні осьювою силою і практично за рівних значень пружних характеристик, як у випадку із залізничними рейками і колесами, контакт відбувається по квазіеліптичній площадці малих розмірів ($\leq 150 \text{ мм}^2$), тому рівень експлуатаційних навантажень ($24 \cdot 10^4 \text{ Н}$ на вісь) зумовлює високі контактні напруження ($700 \dots 1400 \text{ МПа}$) [10]. Такі напруження виникають та зникають практично миттєво (у залежності від швидкості руху поїзда за $0,1 \dots 0,2 \text{ с}$) і мають динамічний характер. При гальмуванні, на початку руху та при русі на прямолінійних ділянках колії відмічається поздовжнє проковзування коліс по рейках, а на криволінійних ділянках у зоні контакту колеса з рейкою – додаткові поперечні зусилля зі складним процесом тертя, тобто мають місце складові тертя ковзання та кочення. Навантаження прикладається циклічно, при цьому рейки зазнають згину. При динамічних навантаженнях на колесо до 150 кН напруження при згині сягають 180 МПа [10].

На електрифікованих ділянках залізниці, які в Україні складають 80% загальної довжини залізничних колій, а також у метрополітені та трамвайній мережі через рейки, зону контакту колесо–рейка та колеса електровозів і моторних вагонів замикається контур живлення електродвигунів. При реалізації максимальної сили тяги, необхідної для зрушення поїзда, його розгону, подолання крутих підйомів, сила струму може в декілька разів перевищувати номінальну за тривалого режиму роботи двигунів. Наприклад, сумарна величина споживаного струму локомотивом серії ВЛ85 при пуску тягових двигунів може сягати 7200 А [11]. Для кожної точки площадки контакту дію електричного струму можна охарактеризувати як імпульсну. Тривалість імпульсу зумовлена в основному швидкістю руху, $\tau = 2a/v$, де a – піввісь площадки контуру; v – швидкість руху, і в інтервалі швидкостей $15 \dots 120 \text{ км/год}$ вона складає $\sim 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-3} \text{ с}$. Амплітуда імпульсу визначається режимом роботи тягового елемента (фактично режимом руху поїзда). Через малу площу площадки контакту та в залежності від рівня споживання локомотивом електричного струму його густина сягає $80 \dots 100 \text{ МА/м}^2$. Як відомо [12], імпульси електричного струму впливають на міцність рейкової сталі, причому ступінь впливу залежить від величини її циклічного напручування.

Природно-кліматичні чинники, зокрема добові і сезонні коливання температури, мають певний вплив на характер взаємодії колеса з рейкою, на зародження та розвиток пошкоджень у контактній зоні. Для кліматичної зони України діапазон таких коливань температур складає $-50 \dots 60^\circ\text{C}$. У вказаному температурному інтервалі при дії електричного струму та за умови підвищеної вологості й агресивного середовища (два останні чинники також планується відтворювати в зоні контакту) набувають розвитку корозійні процеси, стрес-корозія, дефекти та ін.

Таким чином, дослідна установка для вивчення виникнення і розвитку пошкоджень матеріалів у зоні контакту колеса з рейкою в процесі циклічного навантаження при дії електричного струму і кліматичних температур повинна задовольняти таким вимогам:

зразки для випробувань являють собою фрагменти натурних рейок і коліс зі збереженням геометрії і стану робочих поверхонь;

механічні навантаження на контакту зону відповідають експлуатаційним (до 120 кН);

включення контактної зони в електричне коло для проходження через неї, а також через фрагменти рейки й колеса електричного струму заданих параметрів (постійного до 300 А, імпульсного тривалістю до 10^{-2} с і амплітудою до 3000 А);

зразок-колесо повинно циклічно, зворотнопоступально обкочуватися по зразку-рейці однонаправлено або двонапрявлено вздовж його осі (імітація руху на прямо-лінійній ділянці колії);

зразок-колесо циклічно і зворотнопоступально обкочується по зразку-рейці однонаправлено або двонапрявлено за певного кута (до $4,5^\circ$) між площиною колеса і поздовжньою віссю рейки з додаванням контрольованого переміщення при ковзанні, величина якого задається за рахунок зсувного навантаження до 0,5 кН і вибирається за умови реального ковзання колісної пари (імітація руху на криволінійній ділянці колії);

зразок-рейка розміщується на опорах (циліндричних), відстань між якими регулюється (0,5...0,7 м). Електрично ізольовані від решти конструкції опори забезпечують нахил підшви зразка-рейки в напрямку, нормальному до його поздовжньої осі (кут нахилу змінюється від 0 до 5°);

кут між площиною колеса і поздовжньою віссю рейки регулюється в інтервалі $0 \dots \pm 4,5^\circ$;

силові ланцюги навантаження колеса містять пружні елементи для вимірювання відповідних навантажень;

відтворюваність у зоні контакту експлуатаційних чинників та чинників зовнішнього середовища (електричний струм, параметри вказані вище і температура від -60 до 60°C);

забезпечення засобів вимірювання та реєстрації параметрів експерименту і режимів роботи установки.

Ці вимоги було реалізовано при розробці установки, яка отримала умовну назву “УКР-12” (установка колесо–рейка з максимальним навантаженням 12 т), та методів досліджень [13–16].

Загальний вигляд установки УКР-12 наведено на рис. 1. Схему системи навантаження представлено на рис. 2.

Станина силової системи установки включає основу 1 та стояки 2 і 3. На основі розміщено діелектричний брус 4 і захват 5 для зразка-рейки з осьовими упорами 6 і пересувними циліндричними опорами 7, на яких встановлюється зразок-рейка 8. Зразок-колесо 9 закріплюється на секторі 10, через який на нього здійснюється навантаження і відбувається його кочення по зразку-рейці. Сектор горизонтальним шарніром з’єднується з рамкою 11, яка, в свою чергу, за допомогою вертикального шарніра з’єднується з важелем 12. Завдяки вертикальному шарнірові рамка разом із сектором і зразком-колесом можуть бути зафіксовані під певним кутом до поздовжньої осі важеля, що дозволяє імітувати проходження колесом криволінійних ділянок колії. Положення важеля задається за допомогою шкали 13 і ноніуса 14. Один кінець важеля шарнірно з’єднаний з шатуном 15, який, в свою чергу, шарнірно з’єднаний зі стояком. На іншому, довгому плечі (співвідношення плечей складає 1:6) важіль через пружний елемент 16 з’єднаний з пневмоциліндром 17, який живиться стисненим повітрям від компресора 18 з вбудованим ресивером (на рис. 2,а не показано). Зусилля від пневмоциліндра, що контролюється деформацією пружного елемента, протягом експерименту, як правило, не змінюється, і в даному випадку може сягати 2 т. Це зусилля завдяки важелю на зразку-рейці трансформується у 12 т, що відповідає максимальним реальним значенням навантаження на ділянці контакту рейки з колесом.



Рис. 1. Установка для дослідження контактної втоми пари колесо-рейка.

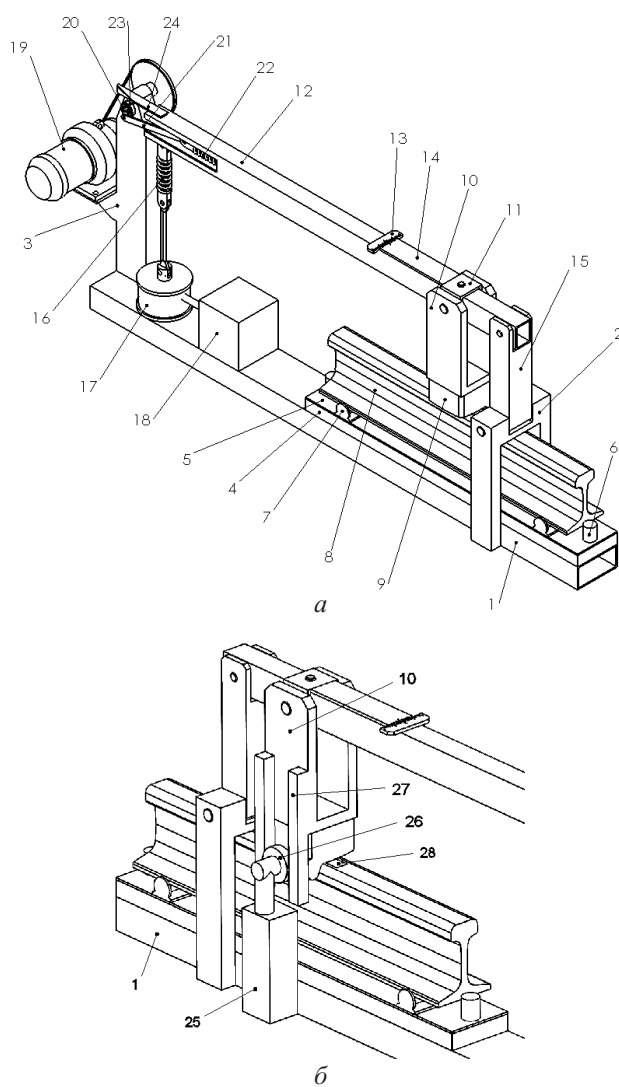


Рис. 2. Схеми системи навантаження установки УКР-12 (а) і механізму для створення тертя ковзання (б).

Для циклічного переміщення колеса по рейці в заданому режимі використовується корбово-шатунний механізм, який приводиться в дію електроприводом 19, розташованим на стояку. Корба 20 з'єднується за допомогою шатуна 21 і пружного елемента 22 з важелем, який приводиться у зворотнопоступальний рух за одночасної дії на нього постійного навантаження від пневмоциліндра. На корбі ексцентрично закріплено підшипник 23, який при проходженні верхньої частини своєї траєкторії взаємодіє зі змінним упором 24 важеля і піднімає його, забезпечуючи розвантаження ділянки контактування зразків колеса і рейки на час половини циклу. Якщо упор зняти, то дія навантаження на ділянку контакту цих зразків буде відбуватись протягом усього циклу. При зменшенні розміру упору можливі варіанти з розвантаженням під час меншої частини півциклу.

Для відтворення реальних процесів у місці контакту зразків колеса і рейки, пов'язаних із тертям ковзання, що супроводжує кочення колеса по рейці, розроблено спеціальний механізм 25, який нерухомо закріплюється на основі (рис. 2,б). Регулюючий ролик 26 цього механізму може встановлюватись на різних рівнях по відношенню до контакту зразків колеса і рейки та взаємодіяти з напрямними 27 сектора, на якому закріплюється зразок-колесо, і зумовлювати при коченні певне ковзання зразка-колеса по зразку-рейці. Даний механізм працює наступним чином.

Відстань від осі обертання сектора зі зразком-колесом до поверхні зразка-рейки позначимо через r_0 . Якщо регулюючий ролик закріпити на рівні контакту, то сектор при переміщенні важеля буде обертатися навколо точки контакту, тобто при чистому коченні, якщо його опустити нижче рівня контакту, то сектор буде обертатися не довкола точки контакту, а довкола центра ролика. При цьому колесо буде одночасно котитися і ковзати по рейці. Новий радіус обертання, тобто відстань між осями сектора і ролика, позначимо через r_1 . При $r_0 = r_1$ взаємодія між рейкою і колесом відбувається в режимі чистого обкочування, при $r_0 < r_1$ до останнього додається ковзання. У цьому випадку, якщо важіль проходить шлях x , точка на ободі описує дугу довжиною $x(r_0 / r_1)$. Різниця між цими відстанями дорівнює величині ковзання $s(x)$:

$$s(x) = x - x \frac{r_0}{r_1} = x \left(1 - \frac{r_0}{r_1} \right) = kx, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт ковзання,

$$k = 1 - \frac{r_0}{r_1}. \quad (2)$$

Таким чином, коефіцієнт k , визначає, яку частину переміщення колесо проходить у режимі чистого ковзання.

Визначимо коефіцієнт k при проходженні колісною парою криволінійної ділянки колії. Для цього знайдемо різницю між довжиною зовнішньої і внутрішньої дуг цієї ділянки, яка дорівнює переміщенню одного з коліс пари в режимі чистого ковзання, і віднесемо її до повного шляху (до довжини зовнішньої дуги).

Довжина зовнішньої дуги L_1 криволінійної ділянки колії, що відповідає центральному куту повороту Θ , буде

$$L_1 = R\Theta, \quad (3)$$

де R – радіус зовнішньої дуги.

Радіус внутрішньої дуги менший на ширину колії A . Відповідно довжина внутрішньої дуги L_2 , що відповідає тому ж куту Θ , така:

$$L_2 = (R - A)\Theta. \quad (4)$$

Коефіцієнт ковзання буде

$$k = \frac{L_1 - L_2}{L_1} = \frac{R\Theta - (R - A)\Theta}{R\Theta} = \frac{A}{R}. \quad (5)$$

Порівняємо праві частини рівнянь (2) і (5) і знайдемо положення ролика r_1 для відтворення ковзання на криволінійній ділянці колії:

$$r_1 = r_0 \frac{R}{R - A}. \quad (6)$$

Наприклад, при моделюванні руху по криволінійній ділянці колії радіусом $R = 500$ м (ширина колії $A = 1,524$ м, $r_0 = 0,36$ м) знайдемо положення регулюючого ролика $r_1 = 0,3611$ м, тобто його необхідно перемістити вниз на 1,1 мм. При випробуваннях матеріалів на зносостійкість у більш жорстких умовах коефіцієнт ковзання можна збільшувати.

Необхідно відзначити наступне: якщо регулюючий ролик знаходиться нижче точки контакту, то напрямком ковзання збігається з напрямком кочення, якщо вище, то ці напрямки протилежні.

До обмежень силонавантажувальної системи установки через велику масу її рухомих частин та значне, на рівні реального експлуатаційного, навантаження на контакт (до 12 т) необхідно віднести доволі низьку частоту циклів навантаження (~ 2 Гц).

Проведення експерименту на установці УКР-12. Зразок-рейку розміщують на циліндричних опорах, відстань між якими встановлюють рівною відстані між шпалами. За допомогою цих опор вибирають кут нахилу підшви рейки до горизонтальної площини ($\sim 3^\circ$). Зразок-коесо зі збереженням геометрії його робочої поверхні закріплюють у секторі. У разі потреби за допомогою ноніуса встановлюють певний кут між вертикальною площиною зразка-коеса і поздовжньою віссю зразка-рейки, а завдяки спеціальному механізму задають певну величину взаємного ковзання поверхонь зразків. За допомогою пневмоциліндра через важіль навантажують до певного рівня зону контакту (рис. 3) і здійснюють циклічне зворотнопоступальне обкочування поверхні зразка-рейки зразком-коесом. Довжина контактної взаємодії при цьому складає $\sim 5L$, де L – розмір (довжина більшої осі еліпса) контактної зони за максимального навантаження.

Для врахування впливу електричного струму на фізико-механічні процеси, що відбуваються як в області взаємодії фрагментів колеса з рейкою, так і в самому матеріалі при такому навантаженні, до зразків колеса та рейки безпосередньо підводять постійний струм або імпульси електричного струму. При цьому, якщо постійний струм діє послідовно по всій площі взаємодії колеса з рейкою по мірі обкочування, то проходження імпульсу електричного струму відбувається синхронізовано з рухом зразка-коеса. Це дозволяє точно визначити область контакту, в якій проходить струм, і провести порівняльний аналіз властивостей зон контакту без та при дії струму за інших рівних умов.

Нагрівання (до 60°C) та охолодження (до -60°C) зразків колеса і рейки здійснюють за допомогою тепловентиляторів та розпилювачів холодних парів азоту. За таких випробувань зразки теплоізолюють від навколишнього середовища, а контроль та регулювання температури здійснюють за показаннями термопар, три з яких встановлюють на зразку-рейці у центрі і на краях зони контакту, а одну – на рухомому зразку-коесі. Перед початком циклічного навантаження зразки охолоджують або нагрівають доти, доки градієнт температури по всьому об'єму їх матеріалу не буде вищим за $\pm 3^\circ\text{C}$, що контролюється додатковими термопарами.

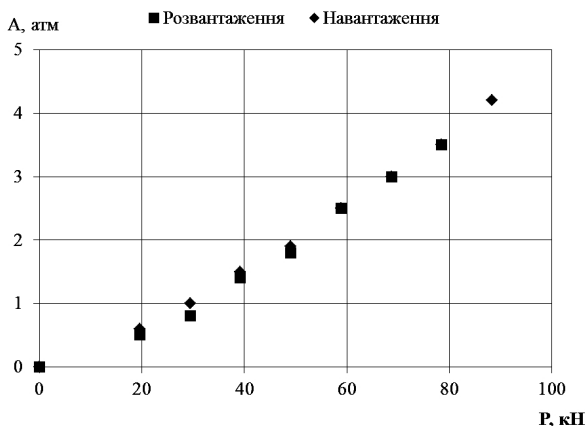


Рис. 3. Залежність навантаження в зоні контакту від тиску в пневмоциліндрі.

У процесі випробувань за допомогою комп'ютерної системи реєстрації параметрів випробувань [17] вимірюють і зберігають для подальшої обробки число циклів та рівень навантаження, температуру зразків, параметри електричного струму, електричний опір у зоні контакту.

Для отримання певної інформації щодо взаємодії зразків колеса з рейкою необхідно в процесі випробувань реєструвати зміну геометричних параметрів у зоні контакту, фіксувати появу і розвиток поверхневих дефектів, а також відслідковувати зміну висоти рельєфу поверхонь взаємодії. Запропонований підхід дозволяє періодично після певного числа циклів навантаження проводити вимірювання і реєстрацію параметрів зони контакту, причому без демонтажу зразків колеса та рейки і повторного, після вимірювань параметрів поверхонь контакту, їх монтажу на установці для продовження експерименту [18]. Операції демонтажу-монтажу неминуче призводять до зміни значень складових системи сил навантаження, що діють у зоні контакту, унаслідок чого порушується ідентичність умов проведення експерименту протягом усього часу.

Суть підходу полягає в тому, що в місці контакту повністю підготовлених до циклічного навантаження зразків розміщують лист пластичного матеріалу (репліку) 28 (рис. 2,б) таким чином, щоб він повністю перекрив усю зону їх подальшої взаємодії, та здійснюють одноразове перекачування зразка-колеса по зразку-рейці. За відбитками на листі визначають вихідні геометричні параметри і стан поверхонь взаємодії колеса з рейкою. Після певного числа циклів активне циклічне навантаження припиняють. У зоні контакту розміщують новий лист такого ж матеріалу, при цьому напрям його прокатки повинен збігатися з напрямом прокатки по відношенню до поздовжньої осі рейки при першому вимірюванні, і, за збереження всіх умов і параметрів експерименту, здійснюють повторне (третє і т.д.) одноразове перекачування фрагменту колеса по фрагменту рейки. Порівняння параметрів відбитків дає можливість оцінити розвиток контактної зони та її стан. Вибір матеріалу репліки можна здійснювати за механічними характеристиками, виходячи зі значення рівня навантаження P , що діє на зону контакту, з використанням модифікованого рівняння Герца:

$$K\sigma_{0,2}^2 \leq P \leq K\sigma_B^2. \quad (7)$$

Тут

$$K = \frac{[E_2(1-\mu_1^2) + E_1(1-\mu_2^2)]lR}{0,3183E_1E_2}, \quad (8)$$

де $\sigma_{0,2}$, σ_b , E_2 , μ_2 – умовна границя плинності, границя міцності, модуль пружності та коефіцієнт Пуассона репліки відповідно; E_1 , μ_1 – модуль пружності і коефіцієнт Пуассона матеріалу колеса або рейки; l – довжина контакту; R – радіус колеса або головки рейки.

Розглянемо деякі напрямки досліджень, що можуть бути розвинені з використанням установки УКР-12. Як відомо, циклічне напруження пари колесо–рейка призводить до суттєвої зміни механічних характеристик матеріалу, з якого вони виготовлені. При цьому така зміна носить градієнтний характер по об'єму коліс і рейок та значною мірою залежить від дії експлуатаційних чинників [19]. Розроблений експериментальний засіб дозволяє вивчати вплив попереднього циклічного навантаження фрагментів коліс та рейок, що здійснюється в умовах силового навантаження та при дії чинників, які відповідають експлуатаційним, на механічні властивості й опір руйнуванню матеріалів цих фрагментів. Мета таких досліджень полягає в оцінці деградації властивостей матеріалів у процесі експлуатації.

Із використанням можливостей установки перспективними є також дослідження циклічної і контактної міцності, опору руйнуванню та інших характеристик зварних стиків рейок, а для спрощення наукового аналізу процесів взаємодії – дослідження контактних зон, утворених поверхнями класичної геометрії, наприклад плоскої і циліндричної, що просто досягається корекцією поверхонь зразків колеса та рейки.

Закладені при розробці установки технічні і конструктивні рішення дають можливість її модернізації з метою подальшого розширення кола досліджень.

Висновок. Описано досліду установку та розроблено методику досліджень зони контактної взаємодії між фрагментами реальних коліс і рейками при дії експлуатаційних чинників.

Резюме

Описана установка для исследования зоны контактного взаимодействия между фрагментами реальных колес и рельсами в условиях, которые соответствуют условиям их эксплуатации на электрифицированных железнодорожных путях.

1. Харрис У. Дж., Захаров С. М., Ландгрэн Дж. и др. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса. – М.: Интекст, 2002. – 408 с.
2. НТД/ЦП-1-93. Классификация дефектов рельсов. НТД/ЦП-2-93. Каталог дефектов рельсов. НТД/ЦП-3-93. Признаки дефектных и острodefектных рельсов. – М.: Транспорт, 1993. – 56 с.
3. Иванов П. С., Лесун А. Ф., Букин М. Н. и др. Классификация дефектов рельсов // Вісн. ДНУЗТ ім. В. Лазаряна. – 2005. – Вип. 8. – С. 156–160.
4. Агарков О. В. Аналіз проблематики утворення дефектів в рейках залізничної колії // Вісн. Нац. трансп. ун-ту. – 2013. – Вип. 28. – С. 3–8.
5. Класифікація та каталог дефектів і пошкоджень рейок залізниць України. ЦП-0285. – Київ: Інпрес, 2013. – 196 с.
6. Cannon D. F., Erel K.-O., Grassie S. L., and Sawley K. Rail defects: an overview // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 2003. – 26, No. 10. – P. 865–886.
7. Цюренко В. Н. Экспериментальное кольцо ВНИИЖТ // Вести ВНИИЖТ. – 2002. – № 4. – С. 12–14.
8. Луке М. Стенд для исследования системы колесо-рельс // Железные дороги мира. – 2005. – № 4. – С. 41–46.

9. Махутов Н. А., Замятин В. О., Тюрин С. А., Щербаков С. С. Оригинальные методы износоусталостных испытаний системы колесо–рельс на малоразмерных моделях // Завод. лаб. Диагностика материалов. – 2008. – 74, № 4. – С. 58–61.
10. Яковлева Т. Г., Карпушенко Н. И., Климов С. И. и др. Железнодорожный путь. – М.: Транспорт, 1999. – 405 с.
11. Тушканов Б. А., Пушкарев Н. Г., Позднякова Л. А. и др. Электровоз ВЛ85. Руководство по эксплуатации. – М.: Транспорт, 1992. – 480 с.
12. Новогрудский Л. С., Оправхата Н. Я. Механические характеристики рельсовой стали при воздействии электрического тока // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2009. – Вып. 32. – С. 120–126.
13. Пат. № 93375 Україна. Спосіб випробувань на контактну взаємодію залізничних рейок і коліс / Л. С. Новогрудський, В. О. Стрижало, Ю. Д. Скрипник, М. Я. Оправхата. – Чинний від 25.09.2014.
14. Пат. № 93377 Україна. Спосіб випробувань на контактну взаємодію залізничних рейок і коліс “Slide” / Л. С. Новогрудський, В. О. Стрижало, Ю. Д. Скрипник, М. Я. Оправхата. – Чинний від 25.09.2014.
15. Пат. № 93376 Україна. Установа для випробувань на контактну взаємодію залізничних рейок і коліс “Stream” / Ю. Д. Скрипник, В. О. Стрижало, Л. С. Новогрудський. – Чинний від 25.09.2014.
16. Пат. № 93378 Україна. Установа для випробувань на контактну взаємодію залізничних рейок і коліс “Slide-Device” / Ю. Д. Скрипник, В. О. Стрижало, Л. С. Новогрудський. – Чинний від 25.09.2014.
17. Новогрудский Л. С., Дроздов А. В., Стрижало В. А., Оправхата Н. Я. Автоматизированная измерительная система регистрации параметров квазидинамических процессов при механических испытаниях материалов в условиях пониженных и криогенных температур и воздействии импульсов электрического тока // Пробл. прочности. – 2015. – № 5. – С. 46–55.
18. Пат. № 110466 Україна. Спосіб випробувань на контактну взаємодію залізничних рейок і коліс “Reprint” / Л. С. Новогрудський, Ю. Д. Скрипник, В. О. Стрижало, С. А. Скакун. – Чинний від 10.10.2016.
19. Новогрудский Л. С., Стасюк С. З., Оправхата Н. Я. Об оценке механических характеристик рельсовых сталей в условиях эксплуатации // Пробл. прочности. – 2010. – № 3. – С. 142–150.

Поступила 18. 10. 2016