УДК 621.316.79 DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.165.2016.87773

ІНДУКЦІЙНИЙ НАГРІВ ЯК СПОСІБ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ЗЧЕПЛЕННЯ КОЛЕСА З РЕЙКОЮ

Канд. техн. наук Н. Д. Чигирик, О. Є. Тимченко, асп. І. Р. Вихопень

ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ КАК СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СЦЕПЛЕНИЯ КОЛЕСА С РЕЛЬСОМ

Канд. техн. наук Н. Д. Чигирик, А. Е. Тимченко, асп. И. Р. Вихопень

INDUCTION HEATING PROCESS CONTROL AS A WAY CLUTCH WHEEL AND RAIL

Phd. tehn. N. D. Chigirik, O. E. Tymchenko, asp. I. R. Vyhopen

Запропоновано спосіб управління коефіцієнтом тертя пари колесо-рейка в експлуатації. У рамках розглянутої пропозиції проведено випробування розрахованого індуктора на лабораторному стенді. Результати випробувань підтвердили зміну коефіцієнта тертя від зміни температури й виявили ряд конструктивних недоліків у підведенні тепла в зону контакту.

Ключові слова: *колесо-рейка, зона контакту, коефіцієнт тертя, тяговий рухомий склад.*

Предложен способ управления коэффициентом трения пары колесо-рельс в эксплуатации. В рамках рассматриваемого предложения проведены испытания рассчитанного индуктора на лабораторном стенде. Результаты испытаний подтвердили

изменение коэффициента трения от изменения температуры и выявили ряд конструктивных недостатков в подведении тепла в зону контакта.

Ключевые слова: *колесо-рельс, зона контакта, коэффициент трения, тяговый подвижной состав.*

The text of this article carried out the algorithm description of the laboratory tests of friction pairs "wheel-rail". The results of tests, the purpose of which is confirmation of the possibility of changing the coefficient of friction by increasing the temperature in the contact zone of the wheel and the rail, finding constructive possibility of providing local warming of the contact zone by induction.

The loss of funds due to friction and wear in the developed countries reach 4 ... 5% of national income, and the frictional resistance absorbs worldwide 20 ... 25% of the produced energy for the year.

Friction management, the right choice of materials for friction and wear resistance criteria, the rational design of friction units and parts of machines and optimization of operating conditions can significantly prolong life and increase the efficiency of vehicles, reducing harmful environmental effects with a slight increase in value.

The detailed analysis of the latest research and publications on the subject.

To achieve this goal established laboratory bench, permitting the wheel to simulate a contact with the rail and provide a varying temperature conditions in the contact zone. For heating the surface layers of the surface of the rolling wheel is designed and manufactured the inductor.

The results of the test series with the calculated inductor are presented in tabular form in the main text of the article.

Tests were carried out with heating of the contact zone to the 800^0C, is not expected for the actual operation, but only to determine the dynamics of change in the coefficient of friction.

In the course of the experiment revealed a number of difficulties in the issue of the nip temperature, it can be solved by changing the electrical parameters of the inductor, the inductor and the geometry of its placement on the heating zone.

Keywords: *wheel-rail, contact area, friction, traction rolling stock.*

Вступ. Втрати коштів від тертя й зношування в розвинутих державах досягають 4...5 % національного доходу, а подолання опору тертя поглинає в усьому світі 20...25 % вироблюваної за рік енергії.

Управління тертям, правильний вибір матеріалів за критеріями тертя й зносостійкості, раціональне конструювання вузлів тертя й деталей машин і оптимізація умов експлуатації можуть суттєво продовжити строк життя й підвищити ефективність машин, знизити шкідливі екологічні впливи при незначному збільшенні їх вартості [1].

У рідких випадках, коли тертя перетворюється з ворога на союзника, зокрема при рушанні тягового рухомого складу з місця й русі на підйом, глибоке знання процесів у контакті пари тертя стає також необхідно, як і для боротьби з ним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченням фізичної природи зчеплення коліс із рейками протягом тривалого часу, особливо в другій половині XX століття займалися багато вітчизняних і закордонних вчених і фахівців (А.М. Бабічков, І.П. Ісаєв, А.Л. Лісіцин, А.Л. Голубенко, Ю.М. Лужнов, А.Н. Долганов та ін.). Існують різні гіпотези фізичної взаємодії колеса й рейки, які не можуть бути повною мірою експериментально перевірені.

У наш час загальне визнання одержала теорія молекулярно-механічної взаємодії контактуючих поверхонь на основі вчення про фізику твердого тіла.

Механічна взаємодія проявляється в процесі деформації і тертя контактуючих поверхонь коліс і рейок, тісно пов'язаному з пружно-в'язкими властивостями матеріалу й мікрогеометрією шорстких поверхонь. Молекулярна складова зчеплення проявляється у вигляді явищ мікросхоплювання і фрикційних зв'язків між колесами і рейками, які виникають у результаті взаємодії неврівноважених молекул і атомів на поверхні твердих тіл, що стискаються [2, 5-7].

Визначення мети та задачі дослідження. Активним напрямком розвитку проблеми взаємодії колеса та рейки є створення умов щодо управління зміною коефіцієнта зчеплення. Метою проведеного дослідження зони контакту колесо-рейка є кількісне визначення коефіцієнта тертя залежно від зміни температури в зоні взаємодії твердих тіл, з'ясування конструктивної можливості забезпечити локальний прогрів зони контакту методом індукції.

Для досягнення поставленої мети створено лабораторний стенд, що дозволяє змоделювати контакт колеса з рейкою й забезпечити зміну температурних умов у зоні контакту. Для нагрівання поверхневих шарів поверхні кочення колеса розраховано і виготовлено індуктор [1].

Основна частина дослідження. До роботи вузла тертя кочення висувають вимоги щодо реалізації помірного постійного опору коченню й обмеженого (якомога меншого) взаємного зношування як колеса (бандажа), так і самої рейки.

Відповідно до першої тріади зовнішнього тертя І.В. Крагельського парі тертя «колесо-рейка» властива наявність звичайного фрикційного процесу з деформацією, тепловим впливом, руйнуванням, зміною властивостей поверхні і відділенням частинок поверхневого шару, а також взаємодія з повітрям, парою рідини (води і мастильних матеріалів), гідрозолями, твердими аерозольними частинками різної природи і матеріалами, що заносяться в зону тертя (твердими і рідкими) із прилеглих до пари тертя поверхонь.

Як показали дослідження Ю.М. Лужнова, більший вплив на утворення специфічних поверхневих шарів, подібних до поверхонь тертя, має вільна поверхнева енергія тертьових тіл, молекулярні сили, адсорбція, фізичні і хімічні процеси, здатні протікати в зоні тертя в десятки і більше раз швидше, ніж на вільних від тертя поверхнях твердих тіл, трибомутаційні процеси та ін. [1].

У загальному випадку (рис. 1) сила тертя між колесом, що перекочується по поверхні рейки, покритої шаром забруднень, складається з таких компонентів:

$$F_T = F_{T.T} + F_{дисп} + F_{деф}, \qquad (1)$$

де $F_{T.T}$ – складова сил тертя, що формується на виступах нерівностей твердого тіла;

$F_{дисп}$ – складова сил тертя, що формується в дисперсному середовищі;

$F_{деф}$ – деформаційна складова більш м'якого матеріалу.

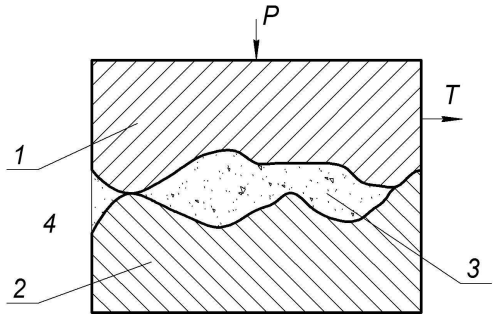

Рис. 1. Модель фрикційної взаємодії в умовах атмосферного і виробничого впливу: 1, 2 – тверде тіло і контртіло; 3 – поверхневе дисперсне забруднення; 4 – навколишнє середовище (атмосфера)

Залежно від режиму навантаження контурна температура в зоні тертя може змінюватися від десятків градусів до 700 °С. Залежно від рівня температури у

великому діапазоні змінюються механічні властивості контактуючих матеріалів і шару забруднення, коефіцієнт їх тертя *ft* і механізми фрикційної взаємодії (рис. 2). Найбільші коефіцієнти тертя (зчеплення) колеса з рейкою, необхідні для більш успішного ведення поїздів, спостерігаються при температурах 400…450 °С.

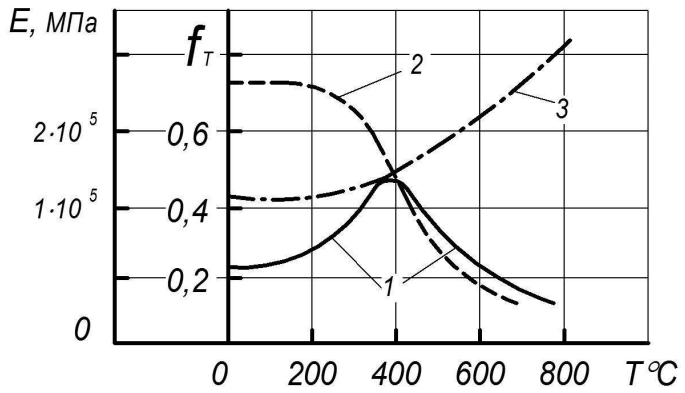

Рис. 2. Зміни параметрів пари тертя «колесо-рейка» від температури *T*: 1 – коефіцієнт тертя f_T запиленого тіла; 2 – модуль пружності Е металу колеса і рейки; 3 – модуль пружності Е поверхневого шару забруднення

Отже, зміна температури контактуючих тіл може бути чинником, за допомогою якого можливе управління коефіцієнтом тертя (зчеплення), що дозволить покращити тягові характеристики рухомого складу в моменти рушання та руху на підйом.

Для перевірки технічної можливості здійснення цієї пропозиції проводяться лабораторні дослідження на спеціальному стенді (рис. 3), який дозволив змоделювати навантаження локомотива на одне колесо [6, 7].

Алгоритм проведення випробувань такий:

– навантажують (115 кН) через шток натискний осі 5, тензодатчик електронного динамометра 4 і навантажувальну раму 3 вісь колеса, що відповідає половині припустимого навантаження на вісь локомотива (230 кН). Створено пляму контакту;

– на майданчик колодки 7, що закріплена на ободі колеса за допомогою болтів 13, через шток натискний зсуву 9, тензодатчик 8 прикладається поступово сила до моменту початку прокручування колеса, про що буде свідчити зміна положення болтів (візуально), а чисельно – момент провалу величини прикладеного зусилля на індикаторі динамометра. Максимальна величина сили і є силою зсуву $F_{сд}$ у даних (за температурою і вологістю) умовах.

Знаючи значення цієї сили, можна обчислити коефіцієнт тертя виходячи з того, що момент відносно точки контакту колеса і рейки буде дорівнювати добутку зовнішньої сили $F_{сд}$, що врівноважує силу тертя, на відстань від центра колеса до точки прикладання сили:

$$M_{т} = F_{сд} \cdot (R + l), \qquad (2)$$

де M_T – момент сили тертя, Н·м;

$R + l$ – відстань від центра колеса до точки прикладання сили, м;

$F_{сд}$ – зовнішня сила зсуву, Н.

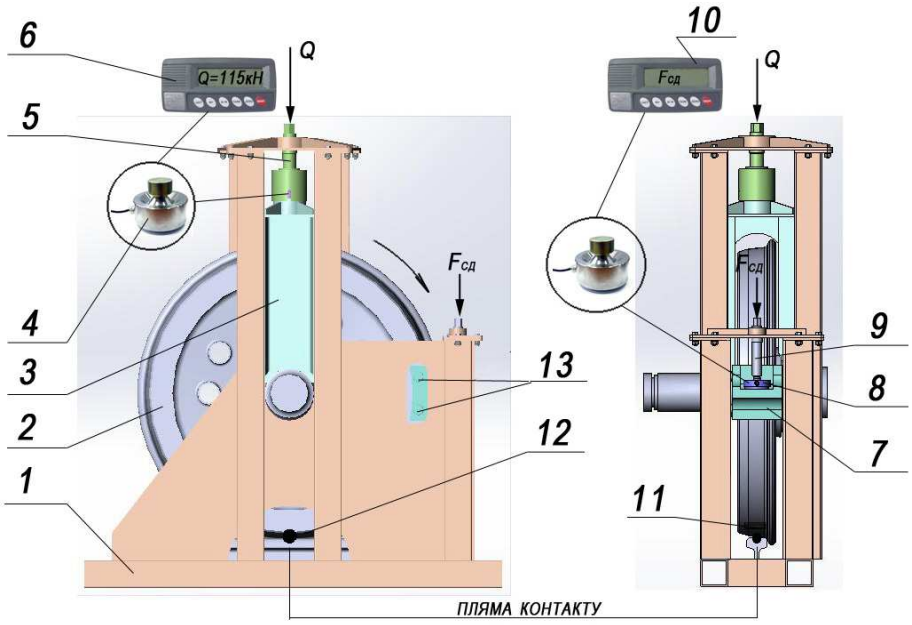

Рис. 3. Модель лабораторного стенда з дослідження впливу температури в області контакту колеса з рейкою на коефіцієнт тертя: 1 – рама; 2 – колесо; 3 – навантажувальна рама осі; 4, 8 – тензометричний датчик динамометра АЦД/1С вимірювання навантаження осі і сили зсуву відповідно; 5 – шток натискний осі; 6, 10 – блок індикації динамометра АЦД/1С вимірювання навантаження осі і сили зсуву відповідно; 7 – колодка; 9 – шток натискний зсуву; 11 – індуктор; 12 – термодатчик; 13 – болти кріплення колодки

З іншого боку, момент тертя дорівнює моменту притискної сили на плече, довжина якого дорівнює коефіцієнту тертя кочення *f*:

$$M_{т} = f \cdot N, \qquad (3)$$

де N – притискна сила, Н;

f – коефіцієнт тертя, м.

З наведених рівнянь коефіцієнт тертя дорівнює

$$f = \frac{M_{т}}{N}; \qquad (4)$$

– змінюючи параметри індуктора (струм, напругу, частоту), змінюємо температуру поверхні колеса в оптимальній, конструктивно обґрунтованій близькості від точки контакту, контролюючи її за допомогою термодатчика 12. Крім того, заміряється час нагрівання. При різних температурах заміряємо силу зсуву і проводимо розрахунки коефіцієнта тертя.

Виходячи з рекомендацій з ремонту колісних пар [3], для поліпшення обточування бандажів колісних пар передбачено багатоступінчастий відпал верхніх шарів металу поверхні кочення: 810-930 °С і 700 °С. Твердість верхніх шарів знижується до НВ 300-320, на глибині 2,5-3,0 мм залишається вихідною, час відпалу – 5 хв.

Отже, оптимальна температура в зоні контакту колеса з рейкою (рис. 2), що дорівнює 400 °С, може бути використана в практиці без загрози порушення цілісності колеса. Застосування індукційного нагрівання ще більше знижує ризик об'ємного прогріву бандажа.

Змінюючи силу струму *I*, можна одержати будь-яку кількість тепла і, отже, будь-яку температуру і будь-яку швидкість нагрівання [4].

Виникаючі в деталі індукційні струми відтискуються до її поверхні. Щільність вихрового струму i_X біля поверхні максимальна і зменшується з наближенням до центра деталі, підкорюючись експонентному закону (поверхневий ефект):

$$i_X = \frac{i_0}{e^{x/\delta}}, \qquad (5)$$

де i_x – щільність індукційного струму на глибині *x* від поверхні деталі, А/см^2;

i_0 – щільність струму на поверхні деталі, А/см^2;

е – основа натурального логарифма (е = 2,718);

x – відстань від поверхні деталі, см;

δ – глибина проникнення вихрового струму в метал, см.

Глибина проникнення вихрового струму в метал – це поверхневий шар виробу, що нагрівається, у якому виділяється основна кількість індукованого струму. Цю величину можна обчислити, користуючись такою формулою:

$$\delta_{хол} = 5030\sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f_{стр}}}, \qquad (6)$$

де $\delta_{хол}$ – глибина проникнення вихрового струму у феромагнітний (холодний) матеріал (деталь), см;

ρ – питомий електричний опір тіла, що нагрівається, Ом·см;

μ – магнітна проникність тіла, що нагрівається;

$f_{стр}$ – частота струму, що живить індуктор, Гц.

Оптимальний вибір частоти струму дозволить досягти необхідної температури за частки секунди і в тонких – від 0,2 до 0,5 мм шарах металу, що повинно бути достатнім, щоб змінити умови тертя, у тому числі й за рахунок процесів, що відбуваються в забрудненнях, що беруть участь у місці тертя.

Індукційне нагрівання металу відбувається в індукторі, який є одним з основних елементів високочастотної установки, значною мірою визначаючи ККД установки і форму шару, що нагрівається.

Для зменшення габаритних характеристик індуктора і значного зниження струмів і питомих потужностей обрано високочастотне нагрівання. Високочастотні індуктори можуть бути менш масивними ще і тому, що при високих частотах внаслідок зменшення струмів різко послаблюються електродинамічні взаємодії між усіма струмопровідними частинами.

У нашому випадку для нагрівання зони контакту колеса з рейкою застосуємо індуктор для нагрівання плоских поверхонь (рис. 4) і розмістимо на відстані 5 мм від поверхні бандажа згідно з ескізом (рис. 5).

Орієнтовний розрахунок індуктора для першої серії випробувань виконано за методикою [3].

З кривих рис. 3.8 [3] знаходимо значення часу нагрівання $t_к$ і питомої потужності ρ_0 з урахуванням нагрівання до 400 °С: $t_к$ = 9,5 с, ρ_0 = 0,41 кВт/см^2.

Визначаємо ширину паза в магнітопроводі

$$a = \frac{0{,}64 \cdot P_Г}{l_Н \cdot \rho_0}, \qquad (7)$$

де a – ширина паза в магнітопроводі, см;

$P_Г$ – потужність генератора, кВт, $P_г$ = 100 кВт;

$l_Н$ – довжина полоси, що нагрівається, приблизно дорівнює довжині магнітопроводу $L_{мп}$, см ;

$$a = \frac{0{,}64 \cdot 100}{70 \cdot 0{,}41} = 2{,}3 \text{ см.}$$

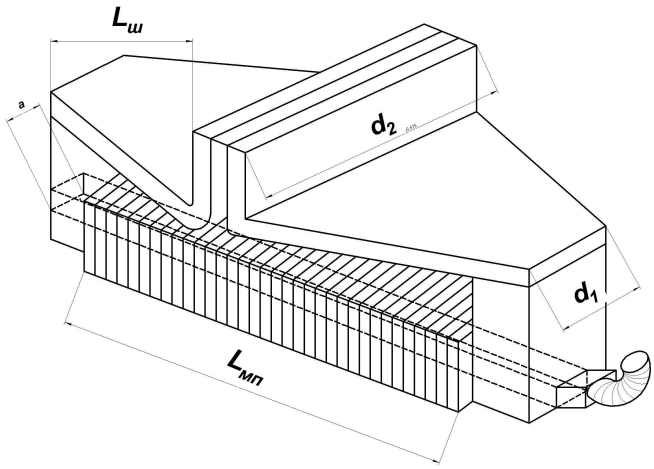

Рис. 4. Ескіз індуктора з магнітопроводом для нагрівання зони контакту колеса з рейкою: $L_ш$ – довжина однієї горизонтальної ділянки струмопровідних шин; $L_{мп}$ – довжина індуктуючого проводу; d_1 – ширина шини біля кінця струмопроводу; d_2 – ширина шини на початку струмопроводу; a – ширина паза в магнітопроводі

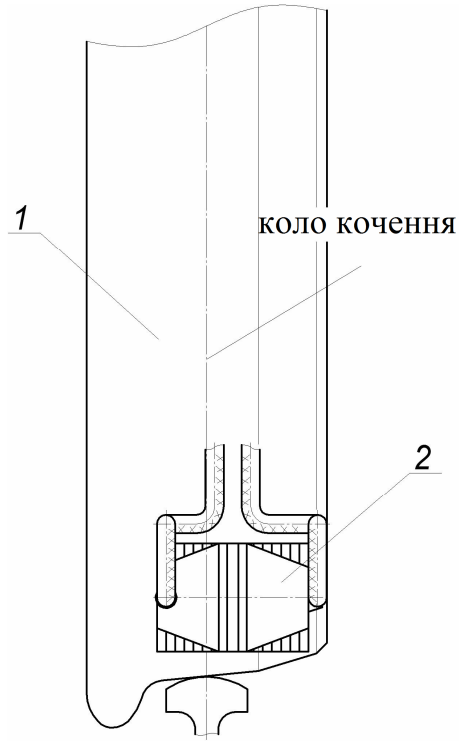

Рис. 5. Схема розміщення індуктора: 1 – колесо; 2 – індуктор

Ширина проводу, що індуктує, визначається як

$$b = a - 2 \cdot \Delta b, \qquad (8)$$

де b – ширина проводу, що індуктує, см;

Δb – товщина ізоляції, прийнята рівною 0,15 см з кожного боку, $b = 2{,}3 - 2 \cdot 0{,}15 =$ = 2,0 см.

Висоту проводу, що індуктує, вибрано з існуючого сортаменту і становить 3 см. Ширина башмака магнітопроводу C приймається рівною $C = (0{,}30...0{,}75) \cdot a$ = = 0,69 … 1,73 см. Прийнято C = 1,5 см.

Напруга на проводі, що індуктує,

$$U = l_н \cdot U_0 \sqrt{\rho_0}, \qquad (9)$$

де U_0 – напруга на 1 см довжини паза, при 250 кГц U_0=19,5 В/см^2.

$$U = 70 \cdot 19{,}5\sqrt{0{,}41} = 874 \text{ В}.$$

Струм в індукторі

$$I_и = a \cdot I_0 \sqrt{\rho_0}, \qquad (10)$$

де I_0 – сила струму на 1 см довжини паза, при 250 кГц I_0=500 В/см^2.

$$I_и = 2{,}3 \cdot 500\sqrt{0{,}41} = 736 \text{ А}.$$

Реактивний опір обох горизонтальних ділянок струмопровідних шин індуктора

$$x_Ш = 2{,}5 \cdot 10^{-8} f_{стр} \cdot L_Ш (2{,}3 \lg \frac{4L_Ш}{d' + \Delta_1} + 0{,}5), \qquad (11)$$

де $x_{Ш}$ – реактивний опір обох горизонтальних ділянок струмопровідних шин, Ом;

$f_{стр}$ – частота струму, Гц;

$L_{Ш}$ – довжина однієї горизонтальної ділянки струмопровідних шин, см;

Δ_1 – глибина проникнення струму в мідь, що залежить від застосовуваної частоти струму, Δ_1 = 0,001 см;

$d' = \frac{d_1 + d_2}{2}$ - еквівалентна ширина шини, см.

Розмір d_2 визначено довжиною контактної колодки знижувального трансформатора

$$d' = \frac{16{,}3 + 3{,}5}{2} = 10 \text{ см.}$$

$$x_{Ш} = 2{,}5 \cdot 10^{-8} 250000 \cdot 28{,}5 (2{,}3 \lg \frac{4 \cdot 28{,}5}{10 + 0{,}001} + 0{,}5) \approx 0{,}52 \text{ Ом.}$$

Падіння напруги на струмопровідних шинах

$$U_{Ш} = x_{Ш} \cdot I_{И} = 0{,}52 \cdot 736 = 382{,}7 \text{ В.}$$

Напруга на індукторі

$$U_{И} = U_{Ш} + U = 382{,}7 + 874 = 1256{,}7 \text{ В.}$$

Потужність, що підводиться до індуктора при ККД індуктора 0,8,

$$P_{И} = p_0 \cdot l_{Н} \cdot a / \eta_{И} = 0{,}41 \cdot 70 \cdot 2{,}3 / 0{,}8 = 82{,}5 \text{ кВт.}$$

Коефіцієнт потужності індуктора

$$\cos\varphi_{И} = \frac{P_{И}}{U_{И} \cdot I_{И}} = \frac{82500}{1256{,}7 \cdot 736} = 0{,}09.$$

Результати серії випробувань, проведених з розрахунковим індуктором, подано в таблиці і на рис. 6.

Таблиця

Зміна коефіцієнта тертя від температури в зоні контакту «колесо – рейка»

T, °C	100	200	300	400	500	600	700	800
f, см	0,157	0,187	0,228	0,235	0,215	0,168	0,147	0,12

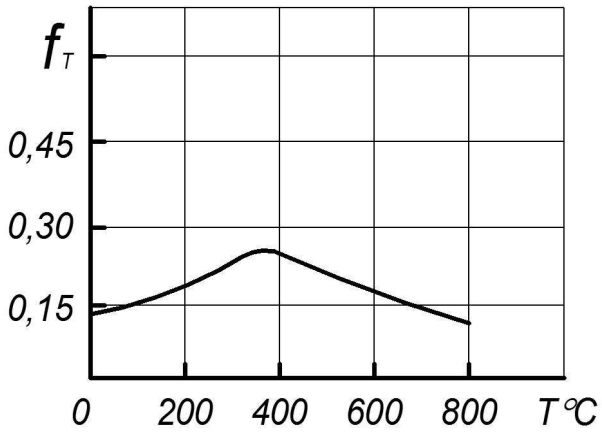

Рис. 6. Зміни коефіцієнта тертя f_T пари тертя «колесо-рейка» від температури Т, °С

Випробування проведено з нагріванням зони контакту до 800 °С, що не передбачається для реальної експлуатації, а тільки для з'ясування динаміки зміни коефіцієнта тертя.

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Проведені дослідження змогли підтвердити можливість зміни коефіцієнта тертя від підвищення температури в зоні контакту колеса і рейки. Під час проведення експерименту виявлено ряд труднощів у питанні доставки температури в зону контакту, що може бути вирішено за допомогою зміни електричних параметрів індуктора, геометрії індуктора і місця розміщення його відносно зони нагріву.

Список використаних джерел

1. Основы трибологии (трение, износ, смазка) [Текст]: учеб. для технических вузов / А. В. Чичинадзе [и др.]; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.

2. Анисимов, В.А Тяговые расчеты [Электронный ресурс]: монография / В.А. Анисимов, В.В. Анисимов – Режим доступа: https://sites.google.com/site/tagapoezd/monografia.

3. Ремонт колесных пар [Электронный ресурс]: справочник технолога по ремонту электроподвижного состава. – Режим доступа: http://lokomo.ru/podvizhnoy-sostav/spravochnik-tehnologa-po-remontu-elektropodvizhnogo-sostava-11.html.

4. Корягин, Ю. Д. Индукционная закалка сталей [Текст]: учеб. пособие / Ю.Д. Корягин, В.И. Филатов. – Челябинск: ЮУрГУ, 2006. – 52 с.

5. Pletz, M. Multi-scale finite element modeling to describe rolling contact fatigue in a wheel-rail test rig [Text] / W. Daves, W. Yao, W. Kubin, S. Scheriau // Tribology International. – 2014. – Vol. 80. – P. 147-155.

6. Wu, B. Analysis of thermal effect on high-speed wheel/rail adhesion under interfacial contamination using a three-dimensional model with surface roughness [Text] / Z. Wen, T. Wu, X. Jin // Wear. – 2016. – Vol. 362-368. – P. 347-369.

7. Guillermo Idarraga Alacron. Power dissipation modeling in whell/rail contact: Effect of friction coefficient and profile quality [Text] / N. Burgelman, J. Meza Meza, A. Toro, Z. Li / Wear. – 2016. – Vol. 362-368. – P. 263-280.

Чигирик Наталія Дмитрівна, канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: 730 19-99.
Тимченко Олексій Євгенійович, магістр Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38(099)-124-56-34.
Вихопень Іван Романович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: 730 19-99.

Chigirik Nataliya Dmitrivna, tehnichnih Ph.D., assoc. of department " Maintenance and repair of rolling stock" Ukranian state university of railway transport. Tel.: 730-19-99.
Tymchenko Oleksiy Evgenievich, assistant driver an electric locomotive depot TCH1 "Krasny Liman" Ukranian state university of railway transport. Tel.: +38 (099) -124-56-34.
Vyhopen Ivan Romanovich, graduate student of "Maintenance and repair of of rolling stock" Ukranian state university of railway transport. Tel.: 730 19-99.

Стаття прийнята 25.10.2016 р.