

УДК 621.316.72; 622.9

## МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ МАТЕРІАЛІВ ФРИКЦІЙНОЇ ПАРИ КОЛЕСО-РЕЙКА З УРАХУВАННЯМ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ЗОНІ КОНТАКТУ ПРИ ПЕРЕДАЧІ РУХУ ТЕРТЯМ

К.А. Зіборов<sup>1</sup>, В.Е. Дитюк<sup>2</sup>, Д.А. Агарков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, завідувач кафедри конструювання технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна, e-mail: [ziborov.k.a@nmu.one](mailto:ziborov.k.a@nmu.one)

<sup>2,3</sup>студент групи 132м-19-2, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

**Анотація.** У роботі на основі теоретичних досліджень параметрів руху транспортного засобу по рейковому шляху сформульована математична модель взаємодії колеса і рейки на елементарній ділянці контакту при наявності нормального і тягового зусилля. Використовуючи аналітичну модель отримана залежність, яка описує зміну усередненої температури на плямі контакту пари колесо–рейка від швидкості руху рейкового транспортного засобу. Визначено поточне значення модуля пружності матеріалу фрикційної пари в залежності від часу контакту.

*Ключові слова:* поверхневий шар, температура, фрикційна пара, рейковий транспортний засіб.

## MECHANICAL PROPERTIES OF THE SURFACE LAYER OF FRICTION WHEEL-RATE MATERIAL MATERIALS TAKEN INTO ACCOUNT OF THERMAL PHYSICAL PROCESSES IN THE CONTACT AREA

K.A. Ziborov<sup>1</sup>, V.E. Dytiuk<sup>2</sup>, D.A. Aharkov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., Head of Department of Engineering and Generative Design, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: [ziborov.k.a@nmu.one](mailto:ziborov.k.a@nmu.one)

<sup>2,3</sup>student of group 132m-19-2, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

**Abstract.** In the work on the basis of theoretical studies of the motion parameters of the vehicle on the rail path, a mathematical model of the interaction of the wheel and the rail in the elementary contact area in the presence of normal and tractive effort is formulated. Using the analytical model, a dependence was obtained that describes the change in the average temperature at the contact point of the wheel-rail pair from the speed of the rail vehicle. The current value of the modulus of elasticity of the material of the friction pair depending on the contact time is determined.

*Keywords:* surface layer, temperature, friction steam, rail vehicle.

**Вступ.** Взаємодія тіл вже давно є актуальною темою для вивчення більшості вчених. Леонардо да Вінчі вважається одним з перших хто почав вивчати та досліджувати сили тертя. Тертя впливає як результат різних видів

складної взаємодії тіл, під час якої відбуваються механічні, фізико-хімічні, електричні процеси та ін. Пізнання природи тертя дає можливість отримати засоби і способи підвищення норм маси транспортних засобів, збереження стійкості їх руху та зниження зносу вихідних ланок і поверхонь, з якими вони контактують.

Взаємодія тіл з рухомою точкою контакту є основою фізичних процесів, пов'язаних з переміщенням вантажів, та процесу кочення, що супроводжується зчепленням і реалізацією сили тяги або гальмування під час виконання основного робочого процесу. За основу процесу зчеплення прийнято вважати фрикційні взаємодії, що відбуваються між цими ланками і зовнішнім середовищем.

Надійна робота більшості сучасних високопродуктивних видів транспорту забезпечується умовами фрикційної взаємодії контактуючих поверхонь. Основною задачею при створенні нових високопродуктивних видів рейкових транспортних засобів полягає в тому, щоб обґрунтувати можливості підвищити ефективність використання сили тяги без збільшення зчіпної маси транспорту [1].

Поява сучасних інформаційних технологій надає можливість приймати для досліджень вихідні передумови та розрахункові схеми з урахуванням конструктивних особливостей транспортних систем не тільки для квазістатичних умов, а й виконувати дослідження динамічних параметрів системи «транспортний засіб – зовнішнє середовище».

**Мета роботи** полягає в визначенні механічних властивостей поверхневого шару матеріалів та фізичних процесів, що відбуваються в зоні фрикційної взаємодії пари колесо-рейка.

**Матеріали досліджень.** Коефіцієнт зчеплення – це відношення тягового зусилля  $Q_{xy}$  так зване зусилля опору, прикладеного по дотичній до поверхні, яка контактує, до сили нормального тиску на цю поверхню  $Q_z$ .

$$f = \frac{Q_{xy}}{Q_z} = \frac{\tau}{p} \leq \mu_0, \quad (1)$$

де  $\tau$  – зсувні напруги, що виникають на майданчику контакту;  $\mu_0$  – коефіцієнт граничного тертя.

Вид і стан поверхні контактуючих тіл, температура поверхні на майданчику контакту, наявність або відсутність мастила, геометричні та реологічні характеристики контактуючих тіл, характер прикладання навантаження та вид напруженого стану матеріалу на майданчику контакту – це найважливіші фактори від яких залежить коефіцієнт зчеплення.

Рух тіла в певний момент часу прийнято визначати вектором лінійної швидкості довільно обраної відлікової точки тіла та вектором його окружної

швидкості в обертальному русі щодо певної вісі, яка проходить через цю точку.

Вплив цих факторів призводить до того, що при кожному оберті колеса ймовірність збігу одних і тих же точок  $O_1$  та  $O_2$  (рис.1) на рейковому шляху та поверхні колеса є випадковим.

Таким чином, рух вихідних ланок транспортних засобів характеризується співвідношенням швидкості руху  $V_1$  і окружної швидкості обертання  $V_2$  (рис.1). Отже, ці співвідношення можна характеризувати як величину відносного ковзання (прослизання).

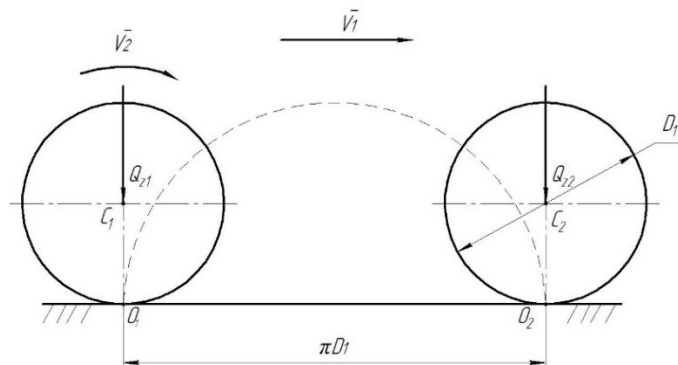


Рис. 1 – Схема руху колеса рейкового транспортного засобу

Швидкість ковзання визначається як векторна різниця швидкостей в точці дотику поверхонь (рис.2).

$$\vec{V}_k = \vec{V}_2 - \vec{V}_1 \quad (2)$$

Емпіричні залежності коефіцієнта зчеплення від швидкості відносного ковзання колеса і рейки показують [2, 3], що під час збільшення швидкості відносного ковзання значення коефіцієнта зчеплення починає зростати, а після досягнення певного значення навпаки зменшується.

Отже, при кожному обороті колеса 1 на його опорному майданчику під дією зовнішніх сил і внутрішньої енергії матеріалу на рейці 2 виникають пружні і пластичні деформації, як наслідок, елементи фрикційної пари колесо-рейка вступають в контакт по майданчику кінцевих розмірів (рис.2) [4].

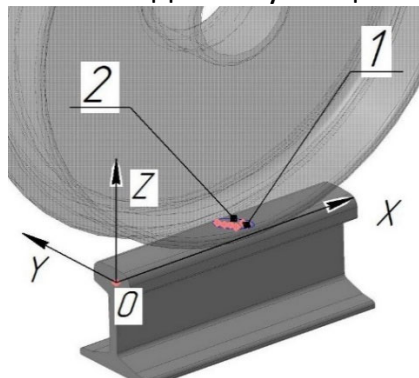


Рис. 2 – Опорна поверхня фрикційної пари колесо-рейка

В результаті високих фактичних тисків і швидкостей ковзання відбувається порушення енергетично рівноважного стану, що викликає появу значних температур в областях взаємодії і призводить до суттєвих змін властивостей поверхневих шарів, викликаючи в них механічні та температурні напружки, сприяючи протіканню хімічних реакцій, активізуючи взаємну дифузію [2, 4, 5]. У поверхневих шарах матеріалів фрикційної пари (в першу чергу вихідних ланок транспортних засобів), що зазнають великі деформації, відбувається утворення і зростання тріщин, накопичення втоми, що в кінцевому рахунку, змінює їх геометрію і порушує умови нормального функціонування.

Колесо, що рухається по рейці може перебувати у трьох режимах:  $Q_{xy} = 0$  – вільному,  $Q_{xy} < 0$  – гальмівному або  $Q_{xy} > 0$  – тяговому режимі. З виразу (1) випливає, що при  $\tau = 0$  коефіцієнт зчеплення також буде дорівнювати нулю. А при збільшенні зсувного навантаження спостерігається збільшення коефіцієнта зчеплення. При цьому на майданчику фактичного контакту  $\Phi$  відбуваються найбільш локалізовані в незначному поверхневому шарі процеси (рис.3).

При збільшенні граничної величини  $\tau$  і постійному часі її зростання до цієї межі, швидкість деформування буде збільшуватися. Якщо деформація перевищує деяку величину, відбувається, так званий, зрив зчеплення, і збільшення швидкості відносної деформації призводить до зменшення коефіцієнта зчеплення.

Як показує вищезазначений аналіз при вивченні цих процесів необхідно враховувати фізико-механічні властивості поверхневих шарів, які відрізняються від властивостей матеріалу, розташованого на значній відстані від його поверхні. Ця різниця з'являється в результаті хімічних і структурних перетворень, механічного та теплового впливу, зносу і контактної втоми матеріалів взаємодіючих поверхонь фрикційної пари колесо–рейка.

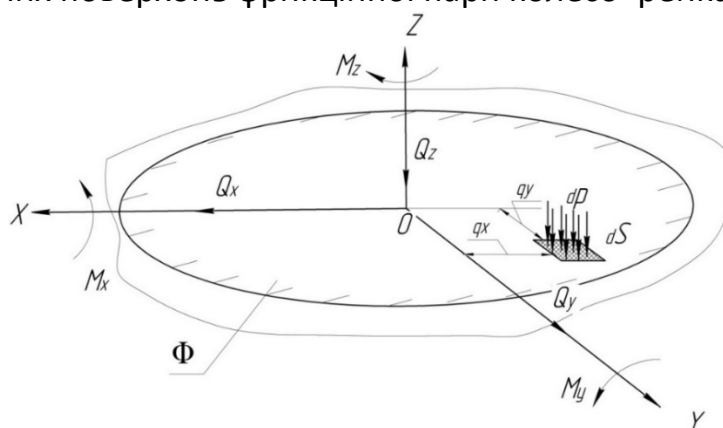


Рис. 3 – Зовнішні сили, що діють на майданчику контакту

Підвищення температури істотно впливає на такі механічні характеристики конструкційних матеріалів, як повзучість і тривала міцність. Повзучість

супроводжується релаксацією напруги – мимовільним зменшенням напруги з часом при незмінній деформації. Швидкість релаксації напруги зростає при підвищенні температури. Температурний коефіцієнт лінійного розширення  $\alpha = \frac{1}{r} \frac{dr}{dT}$  і температурний коефіцієнт модуля пружності  $\eta = \frac{1}{E} \frac{dE}{dT}$

пов'язані між собою співвідношенням  $\eta + \alpha \cdot m = 0$  або  $(\eta/\alpha) = -m = const$ , де  $r$  і  $m$  – постійні, що характеризують параметри кристалічної решітки [6].

У літературі [7] відомо опис залежності, яка описує вплив температури на безрозмірний параметр, що характеризує відношення поточного значення модуля пружності матеріалу до модуля пружності при нормальній температурі:

$$E = E_0 \exp \left[ \alpha_1 \left( 1 - \frac{T_{II} - T_0}{T_{II} - T} \right) \right], \quad (3)$$

де  $E_0$  – модуль пружності при нормальній температурі  $T_0$ ;  $T_{II}$  – температура пластичності стали;  $\alpha_1$  – коефіцієнт пропорційності.

При дослідженні процесу контакту колеса з рейкою цей факт може грати велике значення, оскільки температура поверхонь в центрі плями контакту може перевищувати температуру навколишнього середовища на кілька сотень градусів [1, 2], і при високих температурах, незважаючи на короткий термін її дії, метал стає м'якше, що призводить до відриву його частинок від поверхні. Номінальна твердість бандажа колісної пари  $HB_1$  транспортного засобу менше ніж у рейки  $HB_2$ , тому при аналізі процесу приробітку деформується м'якший матеріал – бандаж. При охолодженні відірвані частки в силу своєї невеликої маси отримують високу твердість, і, в кінцевому підсумку, являють собою абразив, який формує поверхню тертя і створює умови для підвищення коефіцієнта тертя, діючи як додатковий фактор росту тягового зусилля.

Аналітичний опис того, що відбувається переміщення шарів матеріалу контактуючих поверхонь має ґрунтуватися на істотно нелінійних співвідношеннях між діючими силами, деформаціями і відносним ковзанням матеріалу. Ці закони повинні характеризувати несталий стан матеріалу бандажа і рейки при нестаціонарних режимах роботи (особливо при зриві зчеплення), а також враховувати здійснючу при цьому роботу.

Розглянемо більш докладно процес взаємодії при наочненні колеса на ділянку рейки. Як зазначено в [4] контакт буде здійснюватися по майданчику кінцевих розмірів, що має форму еліпса з великою і малою піввісями, відповідно,  $a$  і  $b$ .

При нагріванні тіла на величину  $\Delta T$  його відносне подовження складе  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ . Тобто залежність подовження від температури підкоряється закону  $\varepsilon = \alpha_0 \Delta T$ . Можлива і зворотна задача: при миттєвій деформації, коли енергія деформації не встигає розсіятися, температура тіла підвищиться на величину  $\Delta T = \frac{\varepsilon}{\alpha_0}$ .

З урахуванням розсіювання енергії, залежність буде мати вигляд  $\Delta T = e^{-kt} \frac{\varepsilon}{\alpha_0}$ . З огляду на те, що напруги в тілі  $\sigma = E\varepsilon$ , можна записати:

$$\Delta T = e^{-kt} \frac{\sigma}{E\alpha_0}, \quad (4)$$

де  $k$  – коефіцієнт, що характеризує розсіювання енергії;  $t$  – час;  $\sigma$  – напруги;  $E$  – модуль пружності матеріалу;  $\alpha_0$  – коефіцієнт теплового розширення.

Час  $t$  тривалості контакту взаємодії колеса з рейкою в межах зони контакту  $t_u$ , тобто  $t_u = \frac{2a}{V_1}$ , причому температура (без урахування зміни модуля пружності) за цей час буде:

$$\Delta T = \frac{1}{4} e^{-kt} \frac{1,5Q}{\pi ab E_{np} \alpha_0} \int_{-1}^1 \sqrt{1 - \xi_x^2} d\xi_x \int_{-1}^1 \sqrt{1 - \xi_y^2} d\xi_y, \quad (5)$$

де  $E_{np} = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2}$  – наведений модуль пружності системи колесо–рейка.

Або, після інтегрування:

$$\Delta T = 0,9255 e^{-kt} \frac{1,5Q}{\pi ab E_{np} \alpha_0}. \quad (6)$$

На рис. 4 представлена залежність, яка описує зміну усередненої температури на плямі контакту пари колесо–рейка від швидкості руху рейкового транспортного засобу. Як видно з графіка, із збільшенням швидкості руху рейкового транспортного засобу, температура в зоні контакту також майже лінійно зростає до швидкості 10–15 м/с. При швидкості 40–60 м/с крива виполажується, тобто температура в зоні контакту майже не змінюється.

Перетворимо рівняння (3) до виду:

$$E = E_0 \exp \left[ \alpha_1 \frac{\Delta T}{T_{II} - T_0 - \Delta T} \right], \quad (7)$$

де  $\Delta T$  – перевищення температури контакту над нормальною ( $T_0$ );  $E_0$  – наведений модуль пружності при початковій температурі (20°C).



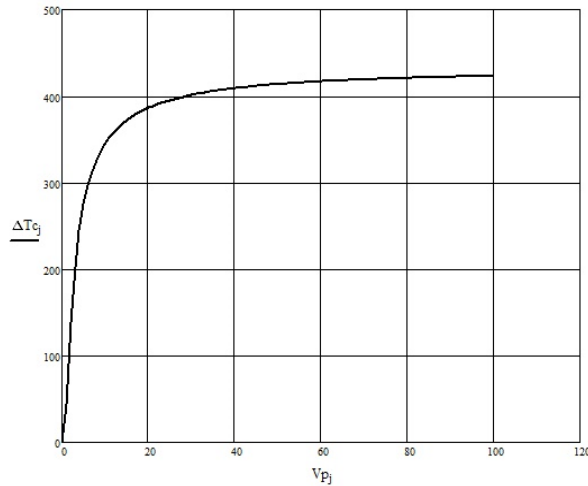


Рис. 4 – Значення усередненої температури на плямі контакту від швидкості руху рейкового транспортного засобу

Як випливає з матеріалів [4, 6, 7], модуль пружності матеріалу впливає, в основному, на коефіцієнти  $\alpha$  і  $\lambda$ , причому зменшення модуля пружності прямо пропорційно впливає на зменшення коефіцієнту  $\alpha$  і зворотно пропорційно до зміни  $\lambda$ .

Модуль пружності матеріалу в залежності від швидкості руху рейкового транспортного засобу:

$$E = E_0 \exp \left\{ \frac{-\alpha_1 \frac{0,9255Q}{\pi a b \alpha_T E_0} \exp\left(-k \frac{a}{V}\right)}{T_{II} - T_0 - \frac{0,9255Q}{\pi a b \alpha_T E_0} \exp\left(-k \frac{a}{V}\right)} \right\}. \quad (8)$$

На рис. 5 представлений графік залежності наведеного модуля пружності пари колесо–рейка від швидкості руху рейкового транспортного засобу.

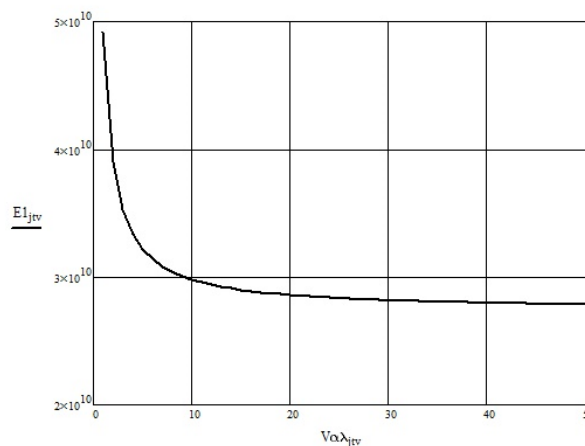


Рис. 5 – Залежність значення наведеного модуля пружності фрикційної пари колесо–рейка від швидкості руху рейкового транспортного засобу

Як видно з графіка, із збільшенням швидкості руху рейкового транспортного засобу, внаслідок підвищення температури в зоні контакту, модуль пружності спочатку знижується досить інтенсивно, а при швидкості 18–20 м/с – крива виполажується, тому що температура в зоні контакту стабілізується.

**Висновок.** При взаємодії тіл з рухомою точкою контакту необхідно враховувати фізико-механічні властивості поверхневих шарів, які відрізняються від властивостей матеріалу, розташованого на значній відстані від його поверхні. Ця різниця з'являється в результаті хімічних і структурних перетворень, механічного та теплового впливу, зносу і контактної втоми матеріалів поверхонь фрикційної пари колесо–рейка.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Голубенко, А.Л. Сцепление колеса с рельсом / А.Л. Голубенко – 2-е изд. доп. и пер. – Луганск: Изд-во ВУГУ, 1999. – 476 с.
2. Костюкевич, А.И. Экспериментальное исследование коэффициента трения при качении со скольжением / А.И. Костюкевич // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2011. – № 4(158). – ч.1. – С. 14–19.
3. Вериго, М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М.Ф. Вериго, А.Я. Коган. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с.
4. Франчук, В.П. Взаємодія тіл з рухомою точкою контакту / В.П. Франчук, К.А. Зіборов. – Дніпро: НГУ, 2017. – 96 с. – Режим доступу: <http://www.nmu.org.ua>.
5. Крагельский, И. В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 276 с.
6. Беляев, Н. М. Сопротивление материалов. / Н.М. Беляев. // Глав. ред. физ-мат. лит.: «Наука», 1976. – 608 с.
7. Минов Д. К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей. – М.: Транспорт, 1965. – 266 с.
8. Зіборов, К.А. Властивості фрикційної пари колесо–рейка, які впливають на процес передачі руху тертям / К.А. Зіборов, Г.К. Ванжа // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2011. – № 4(25). – С. 226–233.

УДК 621.822

### ІНЖИНІРИНГ ОПОРИ КОВЗАННЯ КОЛІНЧАСТОГО ВАЛУ ПРЕСА РЕВОЛЬВЕРНОГО ТИПУ

К.А. Зіборов<sup>1</sup>, Т.О. Письменкова<sup>2</sup>, М. Цонда<sup>3</sup>

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, завідувач кафедри конструювання технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна, e-mail: [ziborov.k.a@nmu.one](mailto:ziborov.k.a@nmu.one)