

УДК 625.1.032:539.3

А. Я. КУЛІЧЕНКО¹, М. О. КУЗІН^{1*}, І. О. ВАКУЛЕНКО²¹Каф. «Рухомий склад і колія», Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. І. Блажкевича 12 а, 79052, Львів, Україна, тел. +38 (093) 741 51 27, ел. пошта kulan47@mail.ru^{1*}Каф. «Рухомий склад і колія», Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. І. Блажкевича 12 а, 79052, Львів, Україна, тел. +38 (050) 170 28 18, ел. пошта n_kuzin@mail.ru²Каф. «Технологія матеріалів», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (095) 79 58 124, ел. пошта dnuzt_texmat@ukr.net**ОЦІНКА ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ КОНТАКТУВАННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ТРИБОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ «КОЛЕСО–РЕЙКА»**

Мета. Сучасні уявлення про контактну взаємодію тіл в умовах тертя ґрунтуються на моделях, які враховують геометричні параметри приповерхневих шарів складових трибо-систем. Дані моделі дозволяють із високим рівнем адекватності описувати особливості рельєфу поверхонь деталей та їх вплив на експлуатаційні характеристики вузлів тертя в умовах пружних навантажень. Разом із тим можливість появи пластичних деформацій, особливо перед початком експлуатації фрикційних систем, дані моделі не враховують. Метою даної роботи є розробка нових математичних підходів опису попередньо прикладених деформацій та їх вплив на експлуатаційні характеристики трибо-систем. **Методика.** Із використанням підходів контактної механіки проведено аналіз впливу попереднього навантаження на контактування плоских шорстких поверхонь із використанням моделі, яка ґрунтується на припущеннях про нормальний розподіл висот мікронерівностей і пластичного деформування при першому навантаженні. **Результати.** Аналітично встановлено, що при помірному зниженні тиску порівняно із початковим фактична площа контакту є пропорційною тиску у відношенні 2/3. **Наукова новизна.** Встановлено, що розмір плями контакту є пропорційним тиску першого навантаження. **Практична значимість.** Показано, що при тисках, менших ніж початково прикладені до контактуючих поверхонь, характерними є більші значення фактичної поверхні контакту, число плям фактичного контакту, ніж для тих же тисків при першому навантаженні.

Ключові слова: мікроступ; шорсткість; контакт; деформація; навантаження

Вступ

Постановка задачі у загальному вигляді. Технічний стан елементів верхньої і нижньої будови залізничної колії повинен відповідати вимогам нормативних документів, які діють на залізничному транспорті України, постійно гарантуючи надійність та безпеку перевезень пасажирів і вантажу.

Контроль технічного стану колії проводиться шляхом систематичного огляду і вимірювань засобами спеціальної апаратури. Для виявлення дефектів у рейках колії використовуються дефектоскопні візки і вагони, обладнані електромагнітними та ультразвуковими дефектоскопами. Дефекти рейок, що виникають внаслідок розвитку процесів стомленості під впливом багаторазових навантажень, які передаються на рейки від надресорної будови вагонів і локомотивів, поділяються на дев'ять груп, детально наведених у спеціальних таблицях [10]. Одним

із видів дефектів рейок є якісні показники їх поверхні, що безпосередньо контактують із колесами засобів рухомого складу залізниці [2].

Характеристики якісних показників поверхневого шару поділяються на геометричні та фізико-механічні. Під геометричними параметрами поверхні слід розуміти параметри шорсткості, хвилястості та макровідхилення на контактуючих поверхнях, які в комплексі приводять до дискретності їх контакту і диференціації площин контакту на фактичну A_f , контурну A_c та номінальну A_d . Максимально можлива площа контакту без врахування шорсткості, хвилястості та макровідхилення вважається геометричною площиною контакту A . Контактуювання поверхонь колеса із рейкою відбувається по фактичній площині контакту A_f , обумовлених присутністю на поверхнях шорсткості,

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

параметри якої нормалізовані згідно ГОСТ 2789-83.

Мета**Аналіз останніх досліджень і публікацій.
Постановка проблеми.**

Останнім часом проведено ряд досліджень в області опису мікрогеометрії поверхонь та їх поведінки при контакті, де наведено, що мікрогеометрія поверхонь може бути описана за допомогою розподілу Гауса [6, 7]. У даних працях показано, що параметри шорсткості поверхні можуть визначатися двома параметрами: середньоквадратичним відхиленням ординати профілю σ та інтервалом кореляції β^* . Останній параметр представляється ще й як середній тангенс кута нахилу одиначної мікронерівності $\text{tg}\theta$, пов'язаний із σ та β^* залежністю $\text{tg}\theta \approx (\sigma/\beta^*)$.

Фактична площа контакту поверхонь колеса і рейки становить малу частину номінальної поверхні (від 5 до 12%). Суттєвий вплив на формування розмірів фактичної площі вносить пластичне деформування її мікрорівностей, що підпорядковується залежності:

$$\frac{A_r}{A_a} = \frac{p}{H}, \quad (1)$$

де p та H – тиск на поверхню та, відповідно, твердість її матеріалу.

Хоча для окремого мікрорівняння в межах пружних деформацій площа поверхні контакту прямо пропорційно залежить від навантаження, під час застосування ряду спрощених моделей виступів можна вважати, що залежність сумарної фактичної поверхні контакту від навантаження наближається до лінійної.

Методика**Викладення основного матеріалу.**

У поданій роботі розглядається вплив попередньо прикладеного навантаження на параметри контактування поверхні при нормальному розподілі висот мікронерівностей та пластичному деформуванні мікрорівностей при першому навантаженні, оскільки вважається, що при такому навантаженні деформації мікрорівностей є повністю пластичними. При зменшенні тиску або при його повторному підвищенні деформа-

ції мікрорівностей будуть пружними (а, відповідно, зворотніми), що обумовлює явище зростання площі фактичного контакту. Взагалі, результати досліджень впливу попереднього навантаження розглядалися як ефект гістерезису.

Згідно представленої моделі контактування у даній публікації зроблена спроба отримання розрахункових залежностей для площі фактичного контакту, кількості одиначних плям контакту окремих мікронерівностей та їх розподілу за розмірами.

Для першого навантаження, коли під впливом певного навантаження дві шорсткі поверхні контактують і притискуються одна до одної (в даному випадку це поверхні ободу колеса і рейки), зусилля навантаження розподіляється на доволі обмежену кількість плям фактичного контакту. Приймаючи деформації мікрорівностей пластичними, можна вважати справедливим для поверхні фактичного контакту вираз (1). При нормальному законі розподілу висот мікронерівностей зв'язок фактичної площі контакту із параметрами мікрогеометрії контактуючих поверхонь описується рівнянням

$$\frac{A_r}{A_a} = 0,5 \cdot \text{erfc}\left(\frac{\eta}{\sqrt{2}}\right); \quad \eta \equiv \frac{Y}{\sigma}, \quad (2)$$

де Y – відстань між середніми площинами зон шорсткості контактуючих поверхонь; σ – середньоквадратичне відхилення ординат ($y_1 + y_2$) спільного поля мікронерівностей двох поверхонь.

Аналіз результатів роботи [6] приводить до висновку, що кількість плям контакту і сума всіх радіусів плям контакту (які апроксимуються колами) можуть виражатись параметрами мікрогеометрії наступним чином:

$$\bar{n} = n \frac{\sigma^2}{\text{tg}^2 \theta} = \frac{1}{16} \frac{\exp(-\eta^2)}{\text{erfc}\left(\frac{\eta}{\sqrt{2}}\right)}; \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\sigma}{\text{tg}\theta} \frac{\sum a_i}{A_a} = \frac{1}{4} \frac{\exp\left(\frac{\eta^2}{2}\right)}{\sqrt{2\pi}}; \quad (4)$$

де a – радіус одиначної плями фактичного контакту.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Величина $\operatorname{tg}\theta$ характеризує середнє значення нахилу мікронерівності спільного профілю, утвореного двома контактуючими поверхнями.

Результати

Розглядаємо початковий контакт – дотикання двох контактуючих поверхонь під час набіганні колеса на рейку (рис. 1).

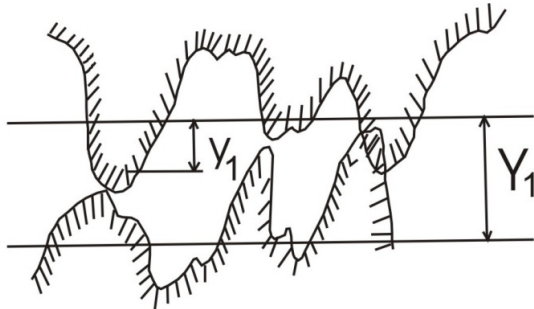


Рис. 1. Мікропрофіль контактуючих поверхонь

Нехай відстань між середніми площинами зон шорсткості рівна Y_1 . Тоді при $y_1 + y_2 > Y_1$ поверхні перебувають у стані контакту. Еквівалентом слід вважати контактування двох поверхонь: абсолютно згладженої і шорсткої, причому ордината профілю шорсткої поверхні характеризується значеннями $(y_1 + y_2)$ з відповідним розподіленням.

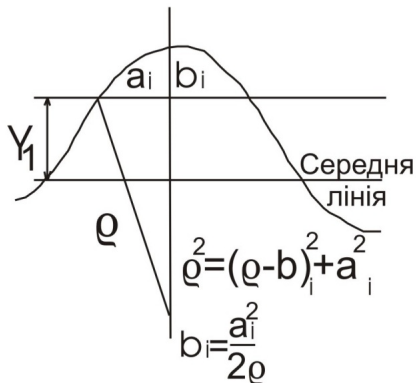


Рис. 2. Одиначний мікровиступ

Мікровиступи, які при Y_1 перебувають у контакті, утворюючи площинку плями дотику радіусом a_i , вступають у контакт до того, як до поверхні було прикладене будь-яке навантаження, коли відстань між середніми площина-

ми становить $(Y_1 + a_i^2)/\rho$ (рис. 2), де ρ – радіус кривизни при вершині мікровиступу.

Приймаємо умову, що значення ρ є однако-вим для всіх одиничних контактів, що виникали при накочуванні колеса і розташовані на однакових відстанях. Таким чином, ρ є функцією від Y , де $\rho(Y)$ є радіусом кривизни мікровиступів, які контактують при відстані Y між поверхнями. Величина ρ розраховується за формулами, наведеними на рис. 2.

Із рис. 2 видно, що для початкового контакту поверхонь можна записати:

$$(\pi \cdot a_i^2)_I = 2\pi\rho \cdot (b_i)_I. \quad (5)$$

При зближенні поверхонь після цього на додаткову відстань ΔY рівняння (5) набуває вид:

$$(\pi \cdot a_i^2)_{II} - (\pi \cdot a_i^2)_I = 2\pi\rho \cdot [(b_i)_{II} - (b_i)_I] = 2\pi\rho\Delta Y. \quad (6)$$

Інтегруючи дане відношення для всіх плям контакту і поділивши на ΔY за умови, що $\Delta Y \rightarrow 0$, отримаємо:

$$\lim_{\Delta Y \rightarrow 0} \frac{A_{rII} - A_{rI}}{\Delta Y} = \frac{d\left(\frac{A_r}{A_a}\right)}{dY} = 2\pi \int_0^\pi \rho dn, \quad (7)$$

де n – кількість плям фактичного контакту на одиниці номінальної поверхні.

Через безрозмірний параметр зближення η цей вираз можна записати:

$$\frac{d\left(\frac{A_r}{A_a}\right)}{d\eta} = 2\pi\sigma \int_\eta^\infty \rho \frac{dn}{d\eta} d\eta. \quad (8)$$

Продиференціювавши останній вираз по η , отримаємо:

$$\frac{d^2\left(\frac{A_r}{A_a}\right)}{d\eta^2} = -2\pi\sigma\rho \frac{dn}{d\eta}, \quad (9)$$

або разом із виразами (2) і (3)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

$$\bar{\rho} \equiv \frac{\rho}{\sigma} \operatorname{tg}^2 \theta = \frac{\eta}{(2\pi)^{3/2}} \frac{\exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right)}{\bar{n}'}, \quad (10)$$

де

$$\bar{n}' \equiv \frac{\sigma^2}{\operatorname{tg}^2 \theta} \frac{dn}{d\eta} = \frac{1}{8} \frac{\exp(-\eta^2)}{\operatorname{erfc}\left(\frac{\eta}{\sqrt{2}}\right)} \cdot \left[\eta - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right)}{\operatorname{erfc}\left(\frac{\eta}{\sqrt{2}}\right)} \right] \quad (11)$$

Зміни параметрів $\bar{\rho}$ та \bar{n}' графічно відображені на рис. 3.

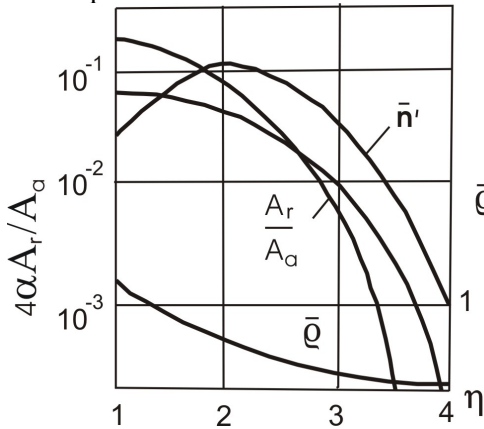


Рис. 3. Залежність параметрів поверхні контакту від η

При заданій відстані η_1 між середніми площинами контактуючих поверхонь на одиниці номінальної поверхні кількість плям контакту, радіус яких знаходиться в інтервалі між a_i та $(a_i + da_i)$, визначається як $\varphi(a_i)da_i$, де

$$\varphi(a_i) = - \left\{ \left[\frac{dn}{d\eta} \right]_{\eta + \frac{a_i^2}{2\rho\sigma}} \right\} \frac{d\left(\frac{a_i^2}{2\rho\sigma}\right)}{da_i} \quad (12)$$

Величина радіусу кривизни ρ при вершині мікроступу представлена у період до навантаження, тобто в момент входу даної площини поверхні колеса у контакт із рейкою. Кількість плям контакту, які виникають між η і $(\eta + d\eta)$,

де $\eta = \eta_1 + \frac{a_i^2}{2\rho\sigma}$, можна визначити з наступної формули:

$$-\frac{dn}{d\eta} d\eta = -\frac{dn}{d\eta} d\left(\frac{a_i^2}{2\rho\sigma}\right) \quad (13)$$

Відношення $\left(\frac{dn}{d\eta}\right)$ слід оцінювати при $\left(\eta_1 + \frac{a_i^2}{2\rho\sigma}\right)$. Аналогічно кількість плям контакту радіусом від a_i до $(a_i + da_i)$ буде рівною $\varphi(a_i)da_i$, де

$$\varphi(a_i) = -\frac{dn}{d\eta} \frac{dn}{da_i} = -\frac{dn}{d\eta} \frac{d\left(\frac{a_i^2}{2\rho\sigma}\right)}{da_i} \quad (14)$$

У відповідності із прийнятою нами моделлю, очікуване значення ρ для кожної одиничної плями на контакті визначається відстанню між середніми площинами поверхонь у положенні, коли контакт лише починає формуватися. Внаслідок цього всі контакти, утворені на даному рівні між двома середніми площинами, будуть мати однакові радіуси кривизни (сумісного профілю). Отже, ρ може бути виражений як функція η , де η характеризує відстань між середніми площинами в момент виникнення контакту.

При заданому максимальному навантаженні на поверхню розподілу p_1 неважко визначити відповідні цьому тиску відношну площу фактичної поверхні контакту $(A_r/A_a)_1$.

Кількість плям контакту на одиниці номінальної поверхні контакту p_1 та безрозмірну відстань між середніми площинами контактуючих поверхонь η_1 . Якщо тепер зменшити навантаження до якогось значення p , меншого від p_1 , то відстань між середніми площинами збільшиться на деяку величину ξ так, що нова відстань між площинами буде характеризуватися безрозмірною величиною $(\eta_1 + \xi/\sigma)$. Радіус одиничної плями контакту при вершині мікроступу, рівний a_{i1} , при $p = p_1$, після зняття

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

навантаження, зменшиться і стане рівним a_i . Нові значення відносної площі контакту (A_r / A_a) і кількість плям контакту n на одиницю номінальної поверхні буде менше відповідних значень (A_r / A_a)₁ та n_1 при першому навантаженні.

Процес переходу $p_1 \rightarrow p$ при $p < p_1$ у відповідності із прийнятою нами моделлю є зворотним, тобто можна відновити перше положення системи збільшенням навантаження до p_1 . Практичне виконання такого відновлення здійснюється при повному оберті (прокочуванні) колеса, хоча цілісного відновлення процесу не відбудеться, оскільки дана площа контакту на поверхні колеса буде повторно контактувати вже з іншою поверхнею рейки.

Для двох контактуючих мікрорівнів у положенні 1 (що відповідає максимальному навантаженню p_1) середній тиск на одиничній площині контакту площею $(\pi \cdot a_i^2)_1$ рівний H . Згідно прийнятої моделі зворотного контакту для навантажень, менших від p_1 , визначаємо, як змінюються радіус площини контакту при вершині мікрорівня a_i та середнє навантаження p_i , що припадають на одиницю площі поверхні площинки контакту $(\pi \cdot a_i^2)$, під час збільшення відстані між середніми площинами на величину ξ .

Отже, розглядаємо варіант контакту двох мікрорівнів під час їх максимального навантаження. Припускаючи, що під час зниження навантаження (збільшення відстані між поверхнями) відбуваються пружні деформації, і, вважаючи, що форма мікрорівнів є сферичною (поблизу контакту), для визначення залежності різних параметрів контакту від переміщення мікрорівнів по відношенню до положення 1 застосовуємо теорію Герца.

Радіус плями дотику a_i згідно з теорією Герца [1], пов'язаний з навантаженням W_i залежністю:

$$a_i^2 = W_i^{3/2} \cdot \frac{1}{2\pi} \frac{R_i^{3/2}}{E}, \quad (15)$$

де $R_i = \frac{2R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ та

$$(\pi \cdot \bar{E}) \equiv \frac{4}{3} \frac{E_1 \cdot E_2}{(1 - \nu_1^2) \cdot E_2 + (1 - \nu_2^2) \cdot E_1}, \text{ де, в свою}$$

чергу: R_1 та R_2 – радіуси кривизни контактуючих мікрорівнів у ненавантаженому стані; E_1 та ν_1 – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона матеріалу колеса; E_2 та ν_2 – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона матеріалу рейки.

Переміщення ΔC , встановлене відносно положення, яке відповідає нульовому навантаженню, для окремо взятого контакту може виражатися наступною залежністю:

$$\Delta C = \sqrt[3]{W_i^2} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{(\pi \cdot \bar{E})^2}} \cdot \sqrt[3]{\frac{2}{R_i}}. \quad (16)$$

Із залежностей (15) і (16) середній тиск на площині контакту двох мікрорівнів визначається як

$$P_{ci} \equiv \frac{W_i}{\pi \cdot a_i^2} = \bar{E} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta C_i}{R_i}}. \quad (17)$$

Крім того, із наведених виразів (15) та (16) одержуємо:

$$a_i^2 = 0,5 \cdot \Delta C_i \cdot R_i \quad (18)$$

У відповідності із прийнятою умовою (17) одержано можливість встановлення відстані між поверхнями, при якій із зменшенням тиску контакт двох мікрорівнів припиняється:

$$\Delta C_{i1} = \frac{H^2}{E^2} \cdot \frac{R_i}{2}. \quad (19)$$

Переміщення ξ із положення 1 в напрямку зменшення навантаження пов'язано з переміщенням, яке встановлене по відношенню до нульового навантаження наступним відношенням:

$$\Delta C_i = \Delta C_{i1} - \xi \quad (20)$$

У відповідності із цим та залежностями (18)–(20) після певних математичних перетворень одержуємо:

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

$$a_i^2 = a_{i1}^2 \cdot \left(1 - \frac{\xi \cdot \bar{E}}{a_{i1} \cdot H}\right), \text{ при } \frac{\xi \cdot \bar{E}}{a_{i1} \cdot H} \leq 1; \quad (21)$$

$$a_i = 0, \text{ при } \frac{\xi \cdot \bar{E}}{a_{i1} \cdot H} > 1; \quad (22)$$

$$\frac{P_{ci}}{H} = \frac{a_i}{a_{i1}} = \sqrt{1 - \frac{\xi \cdot \bar{E}}{a_{i1} \cdot H}}, \text{ при } \frac{\xi \cdot \bar{E}}{a_{i1} \cdot H} \leq 1, \quad (23)$$

$$P_{ci} = 0, \text{ при } \frac{\xi \cdot \bar{E}}{a_{i1} \cdot H} > 1. \quad (24)$$

Із відношення (23) виходить, що всі одиничні площинки контакту, радіус яких у положенні 1 не менше ($\xi \cdot \bar{E} / H$), в новому положенні не будуть перебувати в контакті. На основі цього відношення під час розподілення розмірів одиничних площинок контакту у положенні 1 формулою (12) можна встановити зв'язок різних параметрів контактування із переміщенням у відповідності із наступними залежностями (представленими у безрозмірній формі):

$$\alpha = 2\sqrt{2} \cdot \int_Z^\infty \sqrt{\bar{\rho}} \cdot \bar{n}' \cdot X^2 \cdot \sqrt{1 - \frac{Z}{X}} dX; \quad (25)$$

$$\frac{p}{H} = 4\pi \cdot \int_Z^\infty \bar{\rho} \cdot \bar{n}' \cdot X^3 \cdot \left(1 - \frac{Z}{H}\right) \cdot \sqrt{1 - \frac{Z}{X}} dX; \quad (26)$$

$$\frac{A_r}{A_a} = 4\pi \cdot \int_Z^\infty \bar{\rho} \cdot \bar{n}' \cdot X^3 \cdot \left(1 - \frac{Z}{X}\right) dX; \quad (27)$$

$$\bar{n} = \bar{n}' - 2 \int_0^Z \bar{n}' \cdot X dX, \quad (28)$$

$$\text{де } X \equiv \frac{a_{i1}}{\sqrt{2\rho\sigma}}, \quad Z \equiv \frac{\xi \cdot \bar{E}}{H \cdot \sqrt{2\rho\sigma}},$$

$$\bar{n}' \equiv -\frac{\sigma^2}{\text{tg}^2 \theta} \cdot \left[\frac{dn}{d\eta} \right]_{(\eta_1 + X^2)}.$$

У приведених виразах ρ визначається для $(\eta_1 + X^2)$.

Залежності (25)–(27) зв'язують параметри, необхідні для оцінки переміщення Z , а рівняння (26) зв'язує ρ із Z . При умові що $Z = 0$, із (25)–(27) отримуємо параметри, які відповіда-

ють максимальному тиску p_1 на поверхні контакту. В такому випадку вирази (27) і (28) стають ідентичними і відображають відношення (1) для пластичного деформування. Крім того, підстановка $\bar{\rho}$ із (27) при $Z = 0$ призводить до виразу (2).

Наукова новизна та практична значимість

Аналіз аналітично отриманих виразів, графічно відображених на рис. 4, підтверджує, що відносна площа (A_r/A_{r1}), представлена як функція відношення (p/p_1), де A_{r1} – фактична площа контакту при максимальному тиску. При підвищенні тиску із зростанням навантаження на зону контакту «колесо-рейка», у процесі першого навантаження у відповідності з припущенням про пластичне деформування, величина A_r є пропорційною тиску.

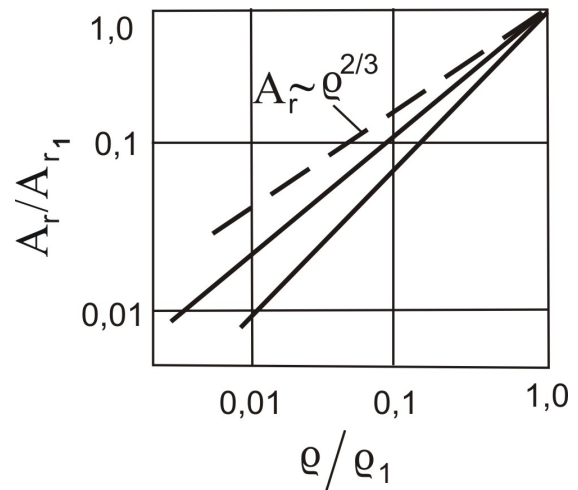


Рис. 4. Залежність відносної площі поверхні фактичного контакту від тиску

Висновки

Для дослідження впливу попереднього навантаження на контактування поверхонь «колесо-рейка» із певним показником шорсткості даних поверхонь застосовувалась теоретична модель, що ґрунтувалась на нормальному розподіленні висоти мікронерівностей (поверхні приймаються гауссовими) і пластичному деформуванню під час першого навантаження. Встановлено, що при помірному зменшенні навантаження (тиску в зоні контакту) у порівнюванні з початковим (в межах $1 > p/p_1 > 0,5$) фактична

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

площа контакту є пропорційною тиску в відношенні $2/3$. При зменшенні тиску p у зоні контакту, тобто при поступовому перекочуванні колеса з певної області на поверхні рейки, ця площа змінюється сильніше – при зміні p у межах одного порядку фактична поверхня контакту в середньому пропорційна $p^{3/4}$.

Взагалі за результатами проведених досліджень слід констатувати, що нетривалий (до часу), нерухомий контакт робочих поверхонь «колеса-рейки» при певному (початковому) навантаженні супроводжується явищем пружно-пластичного деформування матеріалів цих поверхонь. Із збільшенням навантаження на зону контакту, що відбувається у процесі вантажних операцій засобів залізничного транспорту, і нерухомого перебування у такому положенні відбуватиметься процес пластичного деформування контактних поверхонь, що супроводжується руйнуванням залізничних рейок.

Питання збереження в належному технічному стані рейкового полотна в зоні проведення вантажних транспортних операцій і терміну їх тривалості є доволі важливими і заслуговують уваги фахівців-експлуатаційників залізничного транспорту. Розробка практичних рекомендацій із порушеного питання вимагає окремих додаткових досліджень науковців [3, 8, 9, 11–13].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Александров, В. М. Введение в механику контактных взаимодействий / В. М. Александров, М. И. Чебаков. – Ростов н/Д. : Изд-во ООО «ЦВВР», 2007. – 114 с.
2. Вакуленко, І. О. Втома металевих матеріалів в конструкціях рухомого складу / І. О. Вакуленко. – Д. : Маковецький, 2012. – 152 с.
3. Волков, И. А. Уравнение состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями / И. А. Волков, Ю. Г. Коротких. – М. : Мир, 1984. – 624 с.
4. Кузін, М. О. Математичне моделювання параметрів втомної міцності структурно-неоднорідних металічних систем / М. О. Кузін, Т. М. Мещерякова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 38. – С. 213–219.
5. Кузін, О. А. Роль структури в процесах зношування ферито-перлітних сталей / О. А. Кузін, Т. М. Мещерякова, М. О. Кузін // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 37. – С. 224–229.
6. Куліченко, А. Я. Методика визначення якісних характеристик поверхні металу, обробленої інструментом з гнучкими робочими елементами / А. Я. Куліченко // Транспортні системи і технології : зб. наук. праць. – Київ, 2007. – Вип. 11. – С. 67–69.
7. Куліченко, А. Я. Оптимізація параметрів точності при виготовленні та ремонті деталей засобів транспорту / А. Я. Куліченко // Залізн. трансп. України. – 2008. – № 1 – С. 38–39.
8. Прочность материалов и конструкций / Под ред. В. Т. Трошенко. – К. : Академперіодика, 2005. – 1088 с.
9. Сокол, Э. Н. Железнодорожно-транспортное происшествие и его механизм / Э. Н. Сокол. – Львов : Паіс, 2011. – 376 с.
10. Шахунянц, Г. М. Железнодорожный путь / Г. М. Шахунянц. – М. : Транспорт, 1987. – 479 с.
11. Modeling and simulation in engineering / Edited by Catalin Alexandru. – Rijeka, 2012. – 312 p.
12. Popov, V. Contact Mechanics and Friction / V. Popov. – Springer, 2010. – 368 p.
13. Zavarise, G. Trends in Computational Contact Mechanics / G. Zavarise, P. Wriggers. – Springer, 2011. – 354 p.

А. Я. КУЛИЧЕНКО¹, Н. О. КУЗИН^{1*}, И. А. ВАКУЛЕНКО²

¹ Каф. «Подвижной состав и путь», Львовский филиал Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. И. Блажкевича 12 а, 79052, Львов, Украина, тел. +38 (093) 741 51 27, эл. почта kulan47@mail.ru

^{1*} Каф. «Подвижной состав и путь», Львовский филиал Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. И. Блажкевича 12 а, 79052, Львов, Украина, тел. +38 (050) 170 28 18, эл. почта n_kuzin@mail.ru

² Каф. «Технология материалов», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (095) 795 81 24, эл. почта dnuzt_texmat@ukr.net.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОНТАКТИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТРИБОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «КОЛЕСО–РЕЛЬС»

Цель. Современные представления о контактном взаимодействии тел в условиях трения основываются на моделях, которые учитывают геометрические параметры приповерхностных слоев составляющих трибо-систем. Данные модели позволяют с высокой степенью адекватности описывать особенности рельефа поверхностей деталей и их влияние на эксплуатационные характеристики узлов трения в условиях упругих нагрузок. Вместе с тем возможность появления пластических деформаций в поверхностных слоях, особенно перед началом эксплуатации фрикционных систем, данные модели не учитывают. Целью данной работы является разработка новых математических подходов учета предварительно приложенных деформаций и их влияние на эксплуатационные характеристики трибо-систем. **Методика.** С использованием подходов контактной механики проведен анализ влияния предварительной нагрузки на контактирование плоских шероховатых поверхностей с использованием модели, основанной на предположениях о нормальном распределении высот микронеровностей и пластического деформирования при первой нагрузке. **Результаты.** Аналитически установлено, что при умеренном снижении давления по сравнению с исходным, фактическая площадь контакта пропорциональна давлению в отношении 2/3. **Научная новизна.** Установлено, что размер пятна контакта пропорционален давлению первой нагрузки. **Практическая значимость.** Показано, что при давлениях, меньших, чем изначально приложенные к контактирующим поверхностям, характерны большие значения фактической поверхности контакта, число пятен фактического контакта, чем для тех же давлений при первой нагрузке.

Ключевые слова: микровыступ; шероховатость; контакт; деформация; нагрузка

A. J. KULICHENKO¹, N. O. KUZIN^{1*}, I. O. VAKULENKO²

¹Dep. "Rolling stock and track", Lviv branch office, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, I. Blazhkevych Str., 12 а, 79052, Lviv, Ukraine, tel. + 38 (093) 741 51 27, e-mail kulan47@mail.ru

^{1*}Dep. "Rolling stock and track", Lviv branch office, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, I. Blazhkevych Str., 12 а, 79052, Lviv, Ukraine, tel. + 38 (050) 170 28 18, e-mail n_kuzin@mail.ru

²Dep. "Materials technology", Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. + 38 (095) 79 58 124, e-mail dnuzt_texmat@ukr.net

EVALUATION OF QUALITY INDICATORS CONTACTING THE SURFACE OF THE TRIBOLOGICAL SYSTEM «WHEEL–RAIL»

Purpose. Modern ideas about the contact interaction of bodies in friction are based on models that take into account the geometric parameters of the surface layers constituting tribosystems. These models provide a high level of adequacy to describe the features of the relief of the surfaces of parts and their impact on the performance characteristics of friction in the elastic stresses. However, the possibility of plastic deformations in the surface layers, particularly before using friction systems, these models do not account for. The aim of this work is the development of new mathematical approaches previously applied accounting strains and their effect on the performance of tribosystems. **Methodology.** Using the contact mechanics approaches analyzed the influence of

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

preload on contacting a flat rough surfaces using a model based on the assumption of normal distribution of heights and roughness of plastic deformation at the first load. **Findings.** Analytically determined that under moderate pressure reduction from baseline, the actual contact area is proportional to the pressure in the 2/3 power. **Originality.** It is found that the contact patch size is proportional to the pressure of the first load. **Practical value.** It is established that at pressures lower than originally applied to the contact surfaces, the high values of the actual surface contact, the number of patches of actual contact are typical, than for the same pressure at the first load.

Keywords: microirregularity; roughness; contact; deformation; load

REFERENCES

1. Aleksandrov V.M., Chebakov M.I. *Vvedeniye v mekhaniku kontaknykh vzaimodestviy* [Introduction in to mechanics of contact interaction]. Rostov-na-Donu, JSC «CVVR» Publ., 2007. 114 p.
2. Vakulenko I.O. *Vtoma metalevykh materialiv v konstruktsiakh rukhomoho skladu* [Fatigue of metal materials in constructions of rolling stock]. Dnipropetrovsk, Makovetskyi Publ., 2012. 152 p.
3. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G. *Uravneniye sostoyaniya vyazkouprugoplasticheskikh sred s povrezhdeniyami* [State equation of viscoelastic-plastic medium with damages]. Moscow, Mir Publ., 1984. 624 p.
4. Kuzin M.O. Matematychno modeliuвання parametriv vtomnoi mitsnosti strukturno-neodnorodnykh metalichnykh system [Mathematical simulation of fatigue strength parameters in structural non-uniform metallic systems]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 38, pp. 213-219.
5. Kuzin O.A. Rol struktury v protsesakh znoshuvannya feryto-perlitnykh stalei [The role of structure in the ferrite-pearlitic steel wear processes]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 37, pp. 224-229.
6. Kulichenko A.Ya. Metodyka vyznachennia yakysnykh kharakterystyk poverkhni metalu, obroblenoї instrumentom z hnuchkymy robochymy elementamy [Feature finding of metal surface qualitative characteristics, treated by instrument with flexible working elements]. *Transportni systemy i tekhnolohii* [Transport systems and technologies], 2007, issue 11, pp. 67-69.
7. Kulichenko A.Ya. Optyimizatsiya parametriv tochnosti pry vyhotovlenni ta remonti detaley zasobiv transportu [Parameter optimization of accuracy at components of transport equipment making and repair]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway transport of Ukraine*, 2008, no. 1, pp. 38-39.
8. Troshchenko V.T. *Prochnost materialov i konstruktsiy* [Strength of materials and constructions]. Kiev, Akademperiodika Publ., 2005. 1088 p.
9. Sokol Ye.N. *Zheleznodorozhno-transportnoye proisshestviye i yego mekhanizm* [Railway accident and it mechanism]. Lvov, Pais Publ., 2011. 376 p.
10. Shakhunyan G.M. *Zheleznodorozhnyye puti* [Railway lines]. Moscow, Transport Publ., 1987. 479 p.
11. Catalin Alexandru. Modeling and simulation in engineering. Rijeka, 2012. 312 p.
12. Popov V. Contact Mechanics and Friction. Springer, 2010. 368 p.
13. Zavarise G., Wriggers P. Trends in Computational Contact Mechanics. Springer, 2011. 354 p.

Стаття рекомендована до публікації к.т.н., доц. Е. І. Плешаковим (Україна); к.т.н., доц. С. В. Пройдаком (Україна)

Надійшла до редколегії: 10.04.2013

Прийнята до друку: 05.06.2013