

О. П. ОСТАШ, І. М. АНДРЕЙКО, В. В. КУЛИК, В. І. ПРОКОПЕЦЬ (Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів)

## КОНТАКТНО-ВТОМНА ПОШКОДЖУВАНІСТЬ ПОВЕРХНІ КОЧЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС ТИПУ КП-2 ТА КП-Т

Досліджено пошкоджуваність поверхні кочення модельних зразків залізничних коліс. Встановлено основні дефекти поверхні кочення типу вищербина. Запропоновано схеми формування вищербин через пітингоутворення та розшарування.

*Ключові слова:* поверхня кочення, зразок, залізничне колесо, пітингоутворення

Исследована повреждаемость поверхности катания модельных образцов железнодорожных колес. Установлены основные дефекты поверхности катания типа выщербина. Предложены схемы формирования выщербин через питингообразование и расслоение.

*Ключевые слова:* поверхность катания, образец, железнодорожное колесо, питингообразование

The damaging of rolling surface of railway wheels model specimens is investigated. Basic defects of rolling surface of shelling type are determined. The schemes of pit and shelling formation are proposed.

*Keywords:* rolling surface, model, railway wheels, pit formation

У світі щорічно виготовляється 5,4 млн. вагонних коліс (СНД – 1,92; Азія – 1,43; Північна Америка – 1,21; Європа – 0,63; Південна Америка – 0,12; Австралія – 0,06; Африка – 0,03), Україна випускає 550 тис. коліс. Експортують колеса, виключно Європа (174 тис.) та СНД (156 тис.) [1]. Строк їх служби повинен становити 12 років, проте на початку 1990-х років він рівнявся 4...5 рокам [2, 3]. У першу чергу строк служби залізничних коліс визначається властивостями їх поверхні кочення та гребеня.

З позицій економічної ефективності і безпеки експлуатації, підвищення строку служби залізничних коліс є однією з найважливіших проблем залізничного транспорту. На технічне обслуговування і ремонт колісних пар витрачається приблизно 30 % усіх витрат служб рухомого складу залізниці [4]. Більша частина витрат пов'язана з відновленням профілю поверхні кочення експлуатованих коліс та із заміною зношених або пошкоджених коліс.

Впродовж 2008 року під час експлуатації залізничних коліс виявлено 7 тріщин, у т.ч. 4 тріщини у диску, 2 тріщини та один відкол в ободі; під час ремонту виявлено 505 тріщин, в тому числі в ободі – 243, у гребені – 181 і диску – 81 [5]. Більшість цих тріщин припадає на поверхню кочення колеса і спричинюється контактними напруженнями у системі колесо-рейка. Окрім місць з тріщинами втоми і сітки термічних тріщин, на поверхні кочення колеса виявлено також інші типи дефектів (повзуни, вищербини, навари, відколини, повздовжні та поперечні тріщини металургійного походження).

Виникнення повзунів та вищербин, у першу чергу, пов'язують з розпусканням поїздів на механізованих сортувальних гірках. Розлами коліс через наявність втомних тріщин у приободовій зоні суцільнокатаного колеса можуть виникати при перевантаженні вагонів, а також за несприятливого поєднання мінімального розміру ободу колеса і наявності на його поверхні кочення дефектів, що перевищують нормативні допуски і призводять до ударних вертикальних навантажень. Несвоєчасне виявлення тріщин може приводити до зламів коліс біля маточини чи в ободі колеса. В Інструкціях та Правилах прописані норми допусків на розміри цих дефектів на поверхні кочення коліс в експлуатації, виходячи з допустимого ударного впливу на елементи колії і забезпечення цілісності самого колеса. Для усунення та недопущення понаднормативних дефектів в ДА «Укрзалізниці» розроблено Програму підвищення якості коліс на ВАТ «Нижньодніпровський трубопрокатний завод», де серед п'яти основних її пунктів зазначається про необхідність освоєння нових видів коліс підвищеної міцності. Як показала практика експлуатації, виготовлених на цьому підприємстві високоміцних коліс типу КП-Т, їх ресурс підвищився за критерієм зносостійкості на 30...40%. Проте у ряді випадків він скоротився порівняно з традиційно використовуваними середньоміцними колесами типу КП-2 за критерієм пошкоджуваності поверхні кочення, зокрема, повзунів і вищербин (протокол наради у заст. генерального директора Укрзалізниці від 20.01.2009 р.).

**Мета роботи** – дослідити пошкоджувальність поверхні кочення модельних зразків, вирізаних з середньоміцного (типу КП-2) і високоміцного (типу КП-Т) коліс, за умов кочення колеса рейкою.

### Методика випробувань

Випробування проводили на модельних зразках колеса та рейки (рис. 1, а, б), габаритні розміри яких становили: товщина 4 мм, діаметр 40 мм і довжина 220 мм, ширина 4 мм, висота 16 мм, відповідно.

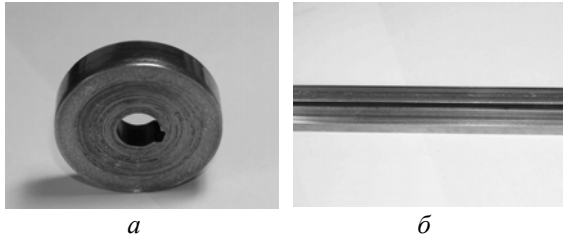


Рис. 1. Модельні зразки колеса (а) і рейки (б)

Експериментальні дослідження проводили при навантаженні на колесо  $P = 250$  кг, тоді напруження в зоні контакту пари колесо-рейка становили [6]:

$$P_0 = 0,5642 \sqrt{\frac{P}{\eta \cdot b \cdot R}} = 0,5642 \sqrt{\frac{250}{0,91 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 20}} = 105 \text{ кг/мм}^2$$

Експериментували на спеціально спроектованому випробувальному стенді (рис. 2) з контролем навантаження тензометричною балкою (динамометр Д1) та сили тертя тензометричною скобою (динамометр Д2).

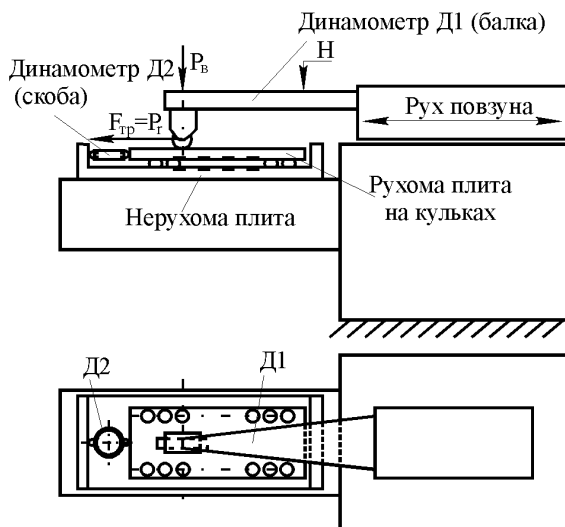


Рис. 2. Схема розміщення основних елементів випробувального стенду

Однією з найпривабливіших функцій випробувального стенду є поступально-зворотний хід повзуна, що забезпечує кочення колеса рейкою під навантаженням тільки в одному напрямку.

Профілографи вищербин отримували інтерферометром «Micron-beta», що реєструє мікротопографію поверхні шляхом обробки послідовних інтерференційних картин в білому світлі за зміщення опорного (еталонного) дзеркала. Це дозволяє отримувати оптичне зображення вищербини, а також її профілі у заданій точці в двох взаємно перпендикулярних площинах. Інтерферометр дозволяє вимірювати максимальну висоту рельєфу ( $Z$ ) до 120 мкм з роздільною здатністю 5 нм.

### Результати досліджень та їх обговорення

Можна виділити основні несправності залізничних коліс (рис. 3). Серед основних дефектів поверхні кочення колеса відзначають: повзун (20), «навар» (21), вищербина (22), місцеве розширення – розчавлювання обода (25), відколина (поверхнева) зовнішньої грані обода (26), відколина кругового напливу (27), цифри в дужках – номер дефекту згідно класифікатора дефектів, що діє в Укрзалізниці [7].

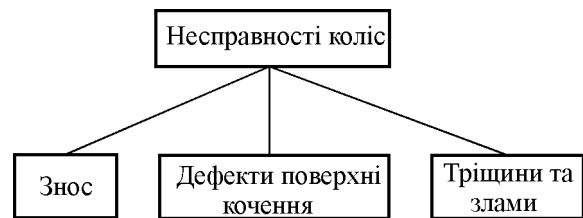


Рис. 3. Несправності залізничних коліс

Пошкодження від тріщин має місце від: поздовжніх тріщин в ободі (30), поперечних поодиноких тріщин в ободі (31), сітки термічних тріщин в ободі (32). Аналогічні класифікатори дефектів складають та вводять у дію на залізницях Євросоюзу [8]. В них прийнято буквенно-цифрове ідентифікування дефекту, наприклад WR 217 – повзуни на поверхні ободу колеса. Порівняно з класифікатором Укрзалізниці в їхньому окремим типом дефекту виділяються пітинги на поверхні ободу колеса (WR 216).

Проведені експериментальні дослідження пошкоджуваності показали, що кількість вищербин, утворених шляхом розшарування є у кілька разів меншою для зразків високоміцного колеса порівняно зі середньоміцними. Загальна кількість цих вищербин становить 25 і 69 штук на контактну поверхню модельного зразка ( $400 \text{ мм}^2$ ), відповідно для сталі високо- та сере-

дньомичного коліс. Площа цих вищербин знаходиться в межах  $0,02...0,675 \text{ мм}^2$ , причому для сталі високомичного колеса відзначається більша однорідність цих вищербин за площею (рис. 4). Зокрема, кількість вищербин середньою площею  $0,075 \text{ мм}^2$  становить 72 % від усієї кількості вищербин на поверхні кочення модельного зразка з високомичної сталі (рис. 4). Тоді як для сталі середньомичного колеса цей показник становить 58 % і характерний ширший діапазон розмірів вищербин, зі зміщенням його в сторону дефектів більших розмірів (рис. 4). Форма таких вищербин доволі різноманітна, проте вони виділяються спільною рисою, а саме: їх контур можна вписати у рівнобедрений трикутник, вершина якого направлена проти напрямку кочення колеса. Це може бути підтвердженням результатів натурних випробувань про вищу зносостійкість коліс КП-Т порівняно з колесами КП-2.

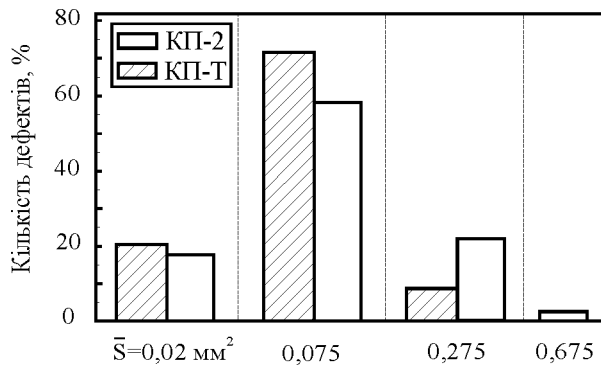


Рис. 4. Розподіл кількості вищербин (розшарувань) на поверхні кочення модельних зразків, вирізаних з високомичного (КП-Т) і середньомичного (КП-2) коліс залежно від розмірів дефектів (за площею  $\bar{S}$ )

Вищербини, утворені через пітингоутворення, виявились більш однотипними, незважаючи на відмінність сталей коліс. За площею пітинга у плані всі вони ідентифікуються на два діапазони: площею  $S_1 = 0,0005...0,000625 \text{ мм}^2$  і площею  $S_2 = 0,00175...0,0025 \text{ мм}^2$ . Кількість пітингів меншої площі переважала і досягала 70 %. Такий розподіл був характерним для сталей високо- та середньомичного коліс. Відмінність полягала у кількості пітингів на одиницю площі, яка для сталі високомичного колеса є удвічі більшою, а середнє значення кількості вищербин через пітингоутворення для неї становить  $45...50 \text{ штук/мм}^2$  (рис. 5).

Якщо порівнювати розміри вищербин, отриманих на модельних зразках і на поверхні кочення залізничних коліс, то їх розміри різняться значно. Наприклад, на поверхні реальних коліс розміри пітингів досягають  $\sim 1,0 \text{ мм}$ , а

окремі з них до  $5 \text{ мм}$  у діаметрі і глибиною до  $1,0 \text{ мм}$  [8]. Враховуючи принцип подібності модельних зразків і реальних коліс, в перших розміри вищербин повинні бути в  $11...22$  рази меншими, що відповідає спостережуваній картині на модельних зразках порівняно з даними класифікаторів дефектів [7, 8].

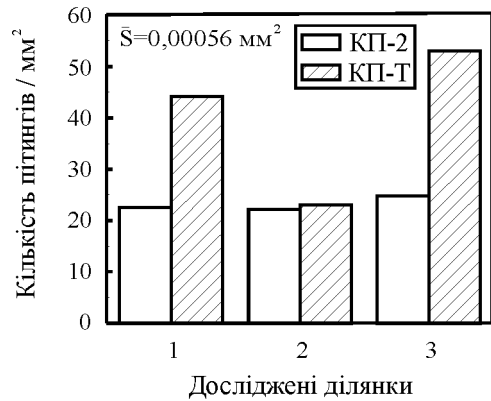


Рис. 5. Розподіл кількості вищербин (пітингів) на трьох різних ділянках (1, 2, 3) поверхні кочення модельних зразків, вирізаних з високомичного (КП-Т) і середньомичного (КП-2) коліс

Проведений аналіз поверхонь кочення модельних зразків дозволив запропонувати схеми утворення вищербин, коли кінетику цього процесу визначає тривалість ( $N$ ) різних стадій розшарування та пітингоутворення (рис. 6 і 7).

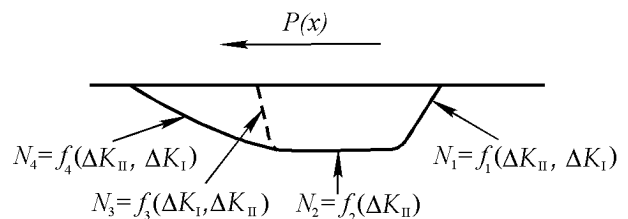


Рис. 6. Схема формування вищербини через розшарування

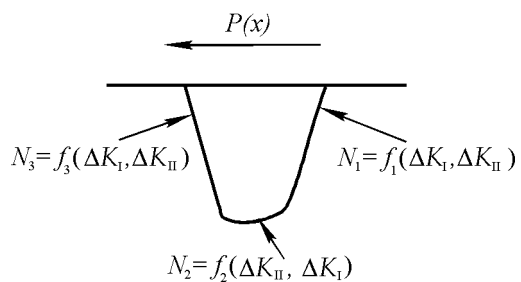


Рис. 7. Схема формування вищербини через пітингоутворення

Спільним для них є те, що ріст втомної тріщини почергово відбувається за різної комбінації нормального відриву ( $K_I$ ) та поперечного зсуву ( $K_{II}$ ). Зародження втомної тріщини може відбуватися як з поверхні кочення, так і з підповерхневих шарів. Не виключена можливість її зародження і від неметалевих включень. Трі-

щина зароджена з поверхні кочення росте вглиб модельного зразка за одночасної дії поперечного зсуву і нормального відриву під певним кутом. Зі зростанням її довжини змінюється механізм руйнування в її вершині: від сумісної дії поперечного зсуву і нормального відриву ( $K_{II} + K_I$ ) через майже виключно, поперечний зсув ( $K_{II}$ ), що займає більшу частку у формуванні вищербини ( $N_2$ ) і до поширення її за поперечним зсувом і нормальним відривом ( $K_{II} + K_I$ ) чи нормальним відривом і поперечним зсувом ( $K_I + K_{II}$ ) ( $N_3$ ) при виході її на поверхню кочення (див. рис. 6). Для вищербини від пітингу характерно незначний період її формування від поширення тріщини, переважно за поперечного зсуву ( $N_2$ ) та протяжні періоди її формування, переважно поширенням тріщин нормального відриву при поширенні їх вглиб поверхні кочення ( $N_1$ ) чи при виході їх на неї ( $N_3$ ) (див. рис. 7).

При цьому треба мати на увазі, що у формуванні вищербин пітингоутворенням і підповерхневим розшаруванням суттєву роль можуть відігравати ендогенні неметалеві включення, розмір яких у колісних сталях складає 5...60 мкм.

З метою отримання профілів вищербин, поверхні кочення модельних зразків досліджували безконтактним інтерференційним 3-D профілографом «Micron-beta». Дослідженню піддавались вищербини, сформовані через пітингоутворення (рис. 8 і 9).

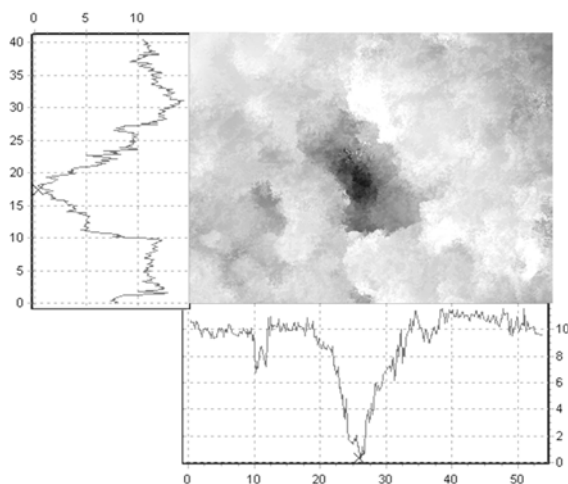


Рис. 8. Профілограми вищербини (пітингоутворення) сталі високоміцного колеса. Розмірність шкал подано в мкм

Отримані профілографи (див. рис. 8 і 9) підтверджують вище запропоновану схему утворення таких дефектів (див. рис. 7). Глибина вищербин (по осі  $z$ ) залежить від властивостей сталей. Вищербини, сформовані у сталі висо-

коміцного колеса (див. рис. 8) є глибшими (10...11 мкм) порівняно з такими для сталі середньоміцного колеса (7...8 мкм, див. рис. 9).

Видно (див. рис. 6 і 7), що для аналізу впливу структури і рівня міцності колісної сталі на кінетику утворення дефектів типу вищербина потрібні кінетичні діаграми втомного руйнування ( $da/dN - \Delta K_I$ ) і ( $da/dN - \Delta K_{II}$ ) [9]. Проте, на даний час відсутні стандартні методики отримання таких діаграм за умов циклічного поперечного зсуву. Коли в зоні контакту втомна тріщина росте за механізмом відриву (за змішаним типом I+II з перевагою типу I), її кінетику визначає розмах КІН змішаного типу  $\Delta K_{I\theta}(a)$ .

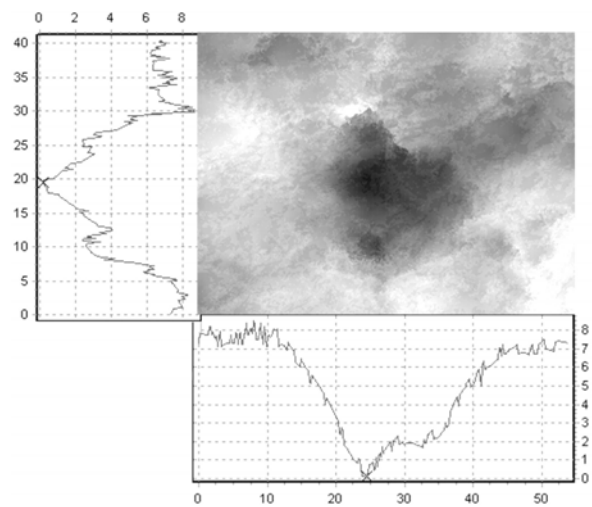


Рис. 9. Профілограми вищербини (пітингоутворення) сталі середньоміцного колеса. Розмірність шкал подано в мкм

Швидкість росту тріщини можна визначати за формулою [8]:

$$da/dN = V_0 \left( \frac{\Delta K_{I\theta} - \Delta K_{Ith}}{\Delta K_{I\theta c} - \Delta K_{I\theta}} \right)^q$$

де  $\Delta K_{Ith}$ ,  $\Delta K_{I\theta c}$ ,  $V_0$  і  $q$  – константи матеріалу і умов випробувань, які визначають на основі діаграм ( $da/dN - \Delta K_I$ ). Із залежності видно, що внаслідок пониженої циклічної в'язкості руйнування  $\Delta K_{I\theta c}$  високоміцної сталі [10] колеса КП-Т повинні мати меншу втомну довговічність за критерієм вищерблювання порівняно з колесами типу КП-2, що узгоджується з вищенаведеними даними (рис. 4 і 5).

## Висновки

Спроектований та виготовлений випробувальний стенд дозволяє отримувати пошкодження поверхонь кочення модельних зразків анало-

гічні спостережуваним на поверхні кочення реальних залізничних коліс.

Виявлено, що за умов кочення без проковзування на поверхні модельних зразків з високоміцного колеса типу КП-Т кількість вищербин, які утворюються шляхом розшарування, є меншою порівняно зі зразками із середньоміцного колеса типу КП-2, шляхом пітингоутворення – навпаки.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Hondius, H. Exploiting synergies in the wheelset market [Text] / H. Hondius // *Railway gazette international*. – 2008. – 164, № 10. – P. 822-824.
2. Матвеев, В. В. Увеличение ресурса вагонных колес низкоуглеродистой легированной сталью наплавкой после отжига поверхности катания [Текст] / В. В. Матвеев // *Мат. 8-ой межд. Научно-практической конф.-выставки «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки»*, Ч. 1, 11-14 апреля 2006. Санкт-Петербург: из-тво Политехнического университета, 2006. – С. 422-424.
3. Богданов, В. М. Современные проблемы системы рельс-колесо [Текст] / В. М. Богданов, С. М. Захаров // *Ж.-д. трансп.* – 2004.- № 1. – С. 57-62.
4. Cassidy, Ph. Perspective materials for production of railway wheels [Text] / Ph. Cassidy // *International Railway Journal*. –2001. – № 12. – P. 40–41.

5. Гаврилюк, О. Ф. Безпека руху: шляхи вирішення проблем [Текст] / О. Ф. Гаврилюк // *Небезпечний контроль*. –2009.– № 1– С. 9–17.
6. Хебды, М. Справочник по триботехнике: Справ. пос.: в 3-х т. [Текст] / Под. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение; Варшава: ВКЛ, 1989.
7. Класифікація несправностей вагонних колісних пар та їх елементів [Текст]. – Затверджено та введено в дію Наказом Укрзалізниці від 15.03.06 р. №095-Ц.
8. Mitura, K. Catalogue of wheel set defects rising during its service life, technical handbook for wheel set keepers [Text] / K. Mitura, R. Faja, P. Matusek, R. Fajkos // No. 25-271 (3<sup>rd</sup> edition).– BONATRANS GROUP.– *Revolucni 1234.– Bohemin.– Czech republic.*– 236 pp.
9. Панасюк, В. В. Експлуатаційна довговічність залізничних коліс із високоміцної сталі [Текст] / В. В. Панасюк та ін. // *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин.* – К.: Ін-т електрозвар. ім. Є.О. Патона НАНУ. – 2009. – С. 659-663.
10. Осташ, О. П. Втомна довговічність сталей залізничних коліс [Текст] / О. П. Осташ та ін. // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2007. – №. 3. – С. 93-102.

Надійшла до редколегії 23.05.2011.

Прийнята до друку 30.05.2011.