

УДК 539.4

ЗАЛИШКОВА ДОВГОВІЧНІСТЬ ОСІ КОЛІСНОЇ ПАРИ ІЗ ПОВЕРХНЕВОЮ ПОПЕРЕЧНОЮ ТРІЩИНОЮ

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ¹, Д. В. РУДАВСЬКИЙ¹, Р. Я. ЯРЕМА²,
В. Р. БАС², Ю. І. КАНЮК¹

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² ПрАТ "Львівський локомотиворемонтний завод"

Запропоновано нову розрахункову методику оцінювання залишкової довговічності осі колісної пари, в основі якої – кінетичне рівняння росту втомної тріщини, що ґрунтується на енергетичному підході механіки руйнування матеріалів. Встановлено, що порівняно малі за розмірами тріщиноподібні дефекти на поверхні осі за невеликий пробіг досягають критичних розмірів. Виявлено, що за заданих умов навантаження залишкова довговічність осі з поверхневою тріщиною залежить не лише від її початкової площі, але і від геометрії фронту тріщини.

Ключові слова: вісь колісної пари, поверхнева втомна тріщина, коефіцієнт інтенсивності напружень, залишкова довговічність.

Осі колісної пари – одні із найвідповідальніших елементів ходової частини залізничного транспорту. За останній час стрімко зросла кількість випадків їх втомного руйнування під час експлуатації вантажних вагонів (рис. 1). Причина цього – поступове нагромадження втомних мікропошкоджень у матеріалі осі за дії циклічного навантаження під час руху потяга. Під впливом високих експлуатаційних згинних моментів її поверхня стає найнапруженішим місцем, а різні мікродефекти (мікротріщини, вм'ятини, зварні опіки тощо) є додатковими концентраторами і без того підвищених механічних напружень. Такі мікропошкодження (як правило, технологічні) і є потенційними місцями зародження та розвитку втомної тріщини, що може призвести до повного руйнування осі під час руху залізничного вагона із важкими катастрофічними наслідками. Тому мета цього дослідження – розробити методику оцінювання залишкового ресурсу осі колісної пари (вантажного вагона) із виявленим на поверхні тріщиноподібним дефектом.

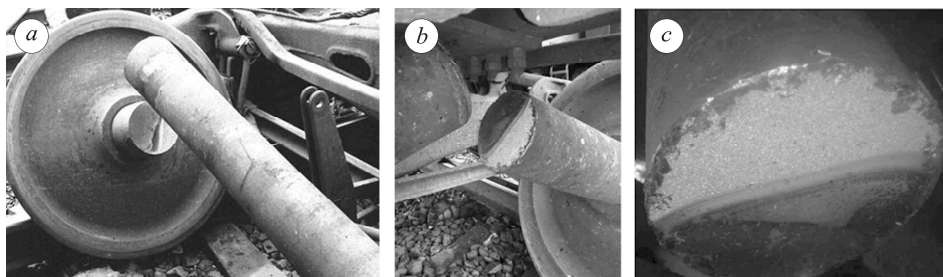


Рис. 1. Втомні злами осі колісної пари вантажних вагонів на ділянці між колесами:
а – біля внутрішньої поверхні колеса; b та c – в її середній частині.

Fig. 1. Fatigue fracture of railway car wheel axle in the section between the wheels:
a – near the wheel internal surface; b and c – in the middle part of the axle.

Контактна особа: Д. В. РУДАВСЬКИЙ, e-mail: rudavsky@gmail.com

Обґрунтування методики досліджень. Втомне руйнування осі колісної пари вивчали у низці вітчизняних і закордонних публікацій [1–5]. Однак невідомі методики, за якими можна оцінювати залишкову довговічність таких металоконструкцій, використовуючи найефективніші енергетичні підходи механіки втомного руйнування. Найпоширеніші дефекти, які виявляють на їх поверхнях, близькі за формою до півеліптичної тріщини (рис. 2). Тому нижче побудуємо розв’язок задачі про визначення залишкової довговічності колісної осі із півеліптичною тріщиною на поверхні її середньої частини (рис. 3а).

Рис. 2. Злами двох відповідних частин зруйнованої осі колісної пари: 1, 2 – ділянки зародження та росту втомної тріщини; 3 – ділянка доламу.

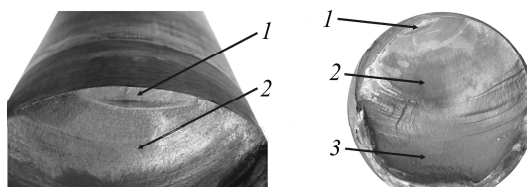


Fig. 2. Fracture surfaces of both corresponding parts of destroyed railway wheel axle: 1, 2 – areas of initiation and growth of fatigue crack; 3 – rupture area.

За експлуатаційного навантаження середня частина осі колісної пари перебуває в умовах, близьких до чистого згину (рис. 3). Проаналізуємо розвиток найнебезпечнішої поперечної поверхневої тріщини (рис. 3б).

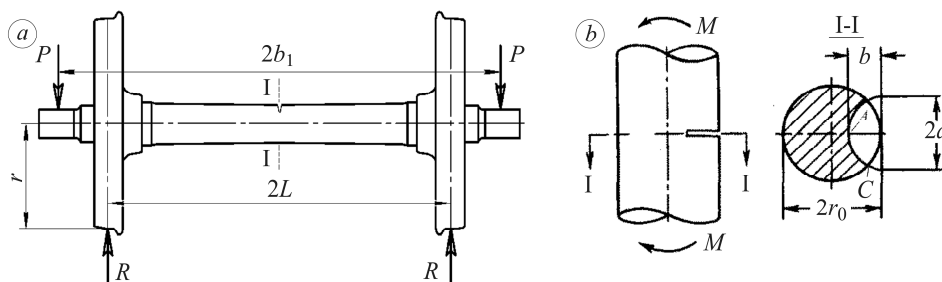


Рис. 3. Схема навантаження колісної пари (для колії завширшки 1520 mm) із поверхневою тріщиною в середньому перерізі II осі (а) та геометрія розташування поперечної півеліптичної тріщини (b).

Fig. 3. Loading scheme of the railway wheel axle (railway width 1520 mm) with a crack in the middle cross section II (a) and configuration and location of a crosscut semi-elliptical crack (b).

Формулювання задачі. Припустимо, що в середній частині осі є півеліптична тріщина і нехай a_0, b_0 – її початкові розміри. Для визначення кінетики контуру тріщини в поперечному перерізі осі (рис. 3б) вважаємо, що під час її поширення він завжди близький до півеліптичного, що, як правило, підтверджується на практиці (рис. 2). Тоді залежності довжин півосей a та b цього контуру (рис. 3б) від кількості циклів навантаження N визначатимуть кінетику росту тріщини, і їх можна отримати із розв’язку системи двох звичайних диференціальних рівнянь [6]

$$da/dN = V_C(K_{IC \max}(a, b)), \quad db/dN = V_A(K_{IA \max}(a, b)) \quad (1)$$

із відповідними граничними умовами

$$a(0) = a_0, \quad b(0) = b_0; \quad a(N_c) = r_0, \quad (2)$$

де $V_{C, A}$ – функції швидкості росту півеліптичного контуру тріщини відповідно у точках C та A (рис. 3б), $K_{IC \max}$ та $K_{IA \max}$ – коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН) у них (рис. 3б), N_c – гранично-допустима кількість циклів навантаження-розвантаження тріщини.

Для визначення функції швидкості V росту втомної тріщини у довільній точці B її півеліптичного контуру (рис. 3b) скористаємося рівнянням (3), яке отримали [7–9] за енергетичним підходом механіки руйнування:

$$V_B(a, b) = a_1 \frac{\Delta K_{IB}^4(a, b) - a_2}{a_3 - (1 - R)^{-2} \Delta K_{IB}^2(a, b, \varphi)}, \quad (3)$$

де $a_i, i = 1, 2, 3$ – деякі константи матеріалу, що визначають із експерименту на втому [10].

КІН K_I для тріщини у точках A та C (рис. 3b) можна подати у вигляді [11]

$$K_{IA,C} = 4M \cdot \pi^{-1} r_0^{-3} \sqrt{\pi \cdot b} F_{A,C}(b/r_0, b/a), \quad (4)$$

де M – згинний момент; $F_A = F_A(b/r_0, b/a)$ та $F_C = F_C(b/r_0, b/a)$ – деякі безрозмірні поправкові функції, що враховують вплив геометрії тіла із тріщиною на КІН відповідно у точках A та C (див. таблицю) [11].

Значення функцій $F_A = F_A(b/r_0, b/a)$ та $F_C = F_C(b/r_0, b/a)$ у точках A та C контуру тріщини, знайдені методом скінченних елементів (рис. 3b).

$b/r_0 \backslash b/a$		b/r_0					
		0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,2	A	0,489	0,523	0,567	0,629	0,731	0,910
	C	0,107	0,172	0,254	0,349	0,477	0,657
0,4	A	0,558	0,554	0,564	0,608	0,695	0,858
	C	0,305	0,321	0,384	0,440	0,560	0,751
0,6	A	0,599	0,582	0,558	0,576	0,638	0,754
	C	0,511	0,529	0,537	0,591	0,657	0,825
1,0	A	0,604	0,582	0,526	0,491	0,482	0,523
	C	0,702	0,755	0,779	0,849	0,961	0,173

Для подальших розрахунків ці табличні дані апроксимували методом найменших квадратів і отримали такі апроксимаційні формули із коефіцієнтом детермінації R -квадрат, близьким до 0,9:

$$F_A(\varepsilon, \eta) = (-1,0368\varepsilon^2 + 1,0839\varepsilon + 0,2840) \cdot \eta^2 + (1,1278\varepsilon^2 - 1,8659\varepsilon + 0,2680) \cdot \eta - 0,3918\varepsilon^2 + 0,6596\varepsilon + 0,3876, \quad (5)$$

$$F_C(\varepsilon, \eta) = (-0,6302\varepsilon^2 + 1,0576\varepsilon + 0,1321) \cdot \eta^2 + (1,8426\varepsilon^2 - 2,6992\varepsilon + 0,7177) \cdot \eta - 0,7234\varepsilon^2 + 1,6815\varepsilon - 0,2215, \quad (6)$$

де $\varepsilon = b/r_0, \eta = b/a$.

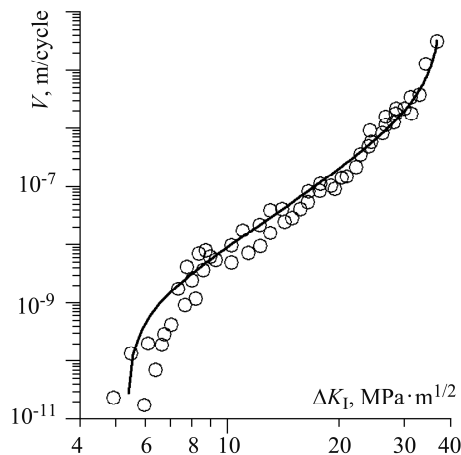


Рис. 4. Кінетичні діаграми росту втомної тріщини в сталі осі колісної пари:

○ – експериментальні дані [1],
суцільна лінія
– розрахунок за ф-лою (3).

Fig. 4. Kinetic diagrams of fatigue crack growth for railway wheel axle steel:

○ – experimental data [1],
solid line – calculation by Eq. (3).

Кінетичну діаграму втомного росту тріщини в зразку зі сталі осі колісної пари вантажного вагона (рис. 4) побудовано раніше [1]. Для випробувань на циклічний розтяг використовували плоскі прямокутні зразки із центральною тріщиною за асиметрії циклу навантаження $R = -1$. За експериментальними результатами методом найменших квадратів визначили константи a_i (R -квадрат $\approx 0,93$) матеріалу осі, що входять у кінетичне рівняння (3), отримане із закону збереження енергії в термодинаміці [12]: $a_1 = 0,33 \cdot 10^{-9} \text{ MPa}^{-2} \text{ cycle}^{-1}$, $a_2 = 820 \text{ MPa}^4 \text{ m}^2$, $a_3 = 360 \text{ MPa}^2 \text{ m}$.

Результати розрахунків. Систему звичайних диференціальних рівнянь першого порядку (1) з урахуванням формул (2)–(6) розв'язували числово методом Рунге–Кутта [13]. Аналіз зламів колісних осей засвідчив (рис. 1 і 2), що зона доламу під час поширення поперечної втомної тріщини в середній частині осі займає приблизно 35...40% загальної площі її поперечного перерізу. Тому критерієм вичерпання залишкового ресурсу осі із тріщиною вважали досягнення довжини її півосі b радіуса $r_0 = 86 \text{ mm}$ середньої частини осі.

Згинальний момент $M \approx 5,6 \cdot 10^{-2} \text{ (MN}\cdot\text{m)}$ у середній частині осі (рис. 3а) розраховували для максимально допустимого навантаження вагона за відомою формулою [14]:

$$M = P \cdot (b_1 - L). \quad (7)$$

Оскільки одне повне обертання осі колісної пари під час руху вагона відповідає одному циклу навантаження-розвантаження на її поверхні із тріщиною (рис. 3а), то за довжиною ободу залізничного колеса легко перейти від залишкової довговічності осі, вираженої у кількості циклів навантаження-розвантаження N_c , до залишкового пробігу вагона S_c в кілометрах. За запропонованою вище методикою побудували відповідні діаграми кінетики розвитку втомної тріщини для визначення величини S_c (рис. 5). Вважали, що розвиток поверхневої тріщини у всіх точках її півеліптичного контуру відповідає кінетичній діаграмі втомного росту тріщини у матеріалі залізничної осі (рис. 4).

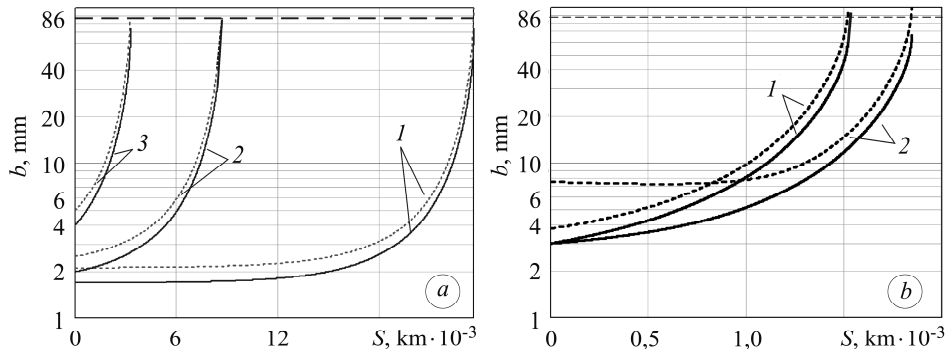


Рис. 5. Криві зміни розміру півосей півеліптичного контуру втомної тріщини (суцільні – піввісь b , штрихові – a) для різних їх початкових значень: a – за співвідношення півосей $b_0/a_0 = 0,8$ (1 – $b_0 = 1,7 \text{ mm}$; 2 – $2,0$; 3 – $4,0$); b – за співвідношення $0,8$ (криві 1) і $0,4$ (криві 2) для $b_0 = 3,0 \text{ mm}$.

Fig. 5. Curves of size variation of semi-axes of semi-elliptical fatigue crack contour (solid – semi-axle b , dashed – a) for different initial values: a – for semi-axes relation $b_0/a_0 = 0.8$ (1 – $b_0 = 1.7 \text{ mm}$; 2 – 2.0 ; 3 – 4.0 ; b – for relation 0.8 (curves 1) and 0.4 (curves 2) for $b_0 = 3.0 \text{ mm}$.

Розрахунок засвідчив, що поверхнева тріщина упродовж $\sim 60\%$ докритичного періоду повільно підростає, а далі стрімко розвивається, досягнувши половини

радіуса осі колісної пари (рис. 5). Залишковий ресурс осі із тріщиною різко падає зі збільшенням її початкових геометричних розмірів за сталого співвідношення півосей півеліптичного контуру дефекту (рис. 6). Однак співвідношення між півосями початкової тріщини суттєво впливає на кінетику її втомного росту і якщо $b_0/a_0 \approx 0,8$, такі тріщини можуть швидше досягати критичних розмірів (рис. 5b), ніж ті, що мають значно більшу початкову площу, але менше значення b_0/a_0 .

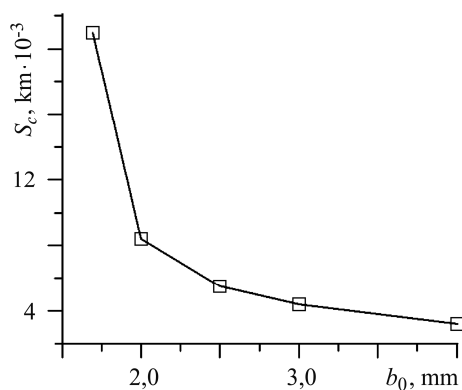


Рис. 6. Залежність залишкового пробігу осі колісної пари із півеліптичною поперечною тріщиною від початкового значення півосі b_0 її контуру за співвідношення $b_0/a_0 = 0,8$.

Fig. 6. Dependence of residual run of wheel axle with a semi-elliptical crosscut crack on the initial value of semi-axle b_0 for relation $b_0/a_0 = 0.8$.

ВИСНОВКИ

Залишковий ресурс осі колісної пари вантажного вагона розраховано за енергетичними підходами механіки втомного руйнування матеріалів. Встановлено, що порівняно невеликі за розмірами тріщиноподібні дефекти на її поверхні можуть за невеликий пробіг досягнути критичних розмірів. Кінетика росту втомної поверхневої тріщини залежить не тільки від площі початкового тріщиноподібного дефекту, але й суттєво – від початкової конфігурації, тобто співвідношення між великою (a_0) та малою (b_0) півосями його півеліптичного контуру. Найнебезпечніші дефекти із відношенням півосей b_0/a_0 , близьким до 0,8, оскільки за порівняно малої початкової глибини ($b_0 \leq 2$ mm) можуть досягати критичного розміру приблизно через 20000 km пробігу залізничного вагона, а зі збільшенням початкових розмірів таких тріщин суттєво знижується залишковий ресурс осі колісної пари.

РЕЗЮМЕ. Предложена новая расчетная методика оценивания остаточной долговечности оси колесной пары, в основе которой – кинетическое уравнение роста усталостной трещины, базирующееся на энергетическом подходе механики разрушения материалов. Установлено, что сравнительно небольшие трещиноподобные дефекты на поверхности оси за небольшой пробег достигают критических размеров. Выявлено, что при заданных условиях нагружения остаточная долговечность оси с поверхностной трещиной зависит не только от ее начальной площади, но и от геометрии фронта трещины.

SAMMARY. A new calculation methodology of residual lifetime estimation of railway wheel axle is proposed. The methodology is based on kinetic equation of fatigue crack growth, obtained by energy approach of fracture mechanics of materials. It is shown, that comparatively small crack-like defects at the wheel axle surface reach critical sizes in comparatively short run. It is shown that at the specified loadings residual lifetime of axle with surface crack depends not only on the crack initial area but on the crack edge geometry as well.

1. *Assessment of lifetime of railway axle* / O. Yasniy, Y. Lapusta, Y. Pyndus, A. Sorochak, V. Yasniy // *Int. J. of Fatigue*. – 2013. – **50**. – P. 40–46.
2. *Smith R. A. and Hillniansen S. A brief historical overview of the fatigue of railway axles* // *Proc. Inst. Mech. Eng. P. F: J. Rail Rapid Transit*. – 2004. – **218**. – P. 267–277.

3. Лубенская Л. М., Колодяжный П. В. Повышение эксплуатационных свойств осей колесных пар за счет упрочнения их поверхности // Вісник Дніпропетровськ. нац. ун-ту залізн. транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – Вип. 38. – С. 41–46.
4. Борзилов І. Д., Шевченко К. В., Калитюк В. Ю. Підвищення якості неруйнівного контролю осей колісних пар вагонів за допомогою коерцитиметрії [Електронний ресурс] // Зб. наук. пр. Укр. держ. академії залізн. транспорту. – 2014. – Вип. 147. – С. 27–31. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpudazt_2014_147_8.
5. Hirakawa R., Toyota K., and Kubota M. The analysis and prevention of failure in railway axles // Int. J. Fatigue. – 1998. – 20. – P. 135–44.
6. Андрейкив А. Е., Дарчук А. И. Усталостное разрушение и долговечность конструкций. – К.: Наук. думка, 1992. – 184 с.
7. Рудавський Д. В. Залишковий ресурс металевих елементів конструкцій у водневмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2011. – 208 с.
8. Скальський В. Р., Рудавський Д. В., Басараб Р. М. Оцінка залишкової довговічності труб магістральних нафтопроводів із поверхневими тріщинами // Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла. – Дніпропетровськ: Ліра, 2012. – Вип. 13. – С. 344–350.
9. Скальський В. Р., Рудавський Д. В., Дубицький О. С. Розрахунок залишкового ресурсу ресорного листа з наявною поверхневою тріщиною // Проблеми прочності. – 2013. – № 1. – С. 33–42.
10. Оцінка розвитку втомного руйнування в'язких конструкційних сталей / В. Р. Скальський, Д. В. Рудавський, П. Я. Галан, І. М. Лясота, П. П. Великий, Я. Д. Толопко // Вісник Дніпропетровськ. нац. ун-ту залізн. транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 33. – С. 251–254.
11. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2-х т. / Пер. с англ. под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – Т. 2. – 1016 с.
12. Киреев В. А. Курс физической химии. – М.: Химия, 1975. – 776 с.
13. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. – М.: Бинум, 2001. – С. 363–375.
14. Беляев Н. М. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1976. – 608 с.

Одержано 15.03.2016