

УДК 629.42.027.2:539.376

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ¹, І. Я. ДОЛІНСЬКА^{2*}, Д. В. РУДАВСЬКИЙ^{3*}, Р. Я. ЯРЕМА⁴,
В. Р. БАС^{5*}

¹Відділ акустико-емісійного діагностування елементів конструкцій, Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, Львів, Україна, 79060, тел. +38 (032) 263 12 64, ел. пошта skal@ipm.lviv.ua, ORCID 0000-0002-3799-0883

^{2*}Відділ акустико-емісійного діагностування елементів конструкцій, Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, Львів, Україна, 79060, тел. +38 (032) 229 68 75, ел. пошта ira_dolinska@ukr.net, ORCID 0000-0003-1143-8895

^{3*}Відділ акустико-емісійного діагностування елементів конструкцій, Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, Львів, Україна, 79060, тел. +38 (032) 229 65 46, ел. пошта rudavskyy@gmail.com, ORCID 0000-0001-5541-3003

⁴ПрАТ «Львівський локомотиворемонтний завод», вул. Залізнична, 1а, Львів, Україна, 79018, тел. +38 (032) 233 30 25, ел. пошта general@lvivlrz.com, ORCID 0000-0002-1560-6078

^{5*}ПрАТ «Львівський локомотиворемонтний завод», вул. Залізнична, 1а, Львів, Україна, 79018, тел. +38 (032) 233 02 96, ел. пошта v_bas@mail.ua, ORCID 0000-0002-8308-8807

МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ЗАЛИШКОВОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ РАМИ ВІЗКА ЛОКОМОТИВА З УРАХУВАННЯМ ПОВЗУЧОСТІ

Мета. Проблема визначення залишкового ресурсу елементів рами візка електровозів має велике значення для прогнозування їх безпечної роботи та уникнення можливих аварій на колії. Особливо це стосується випадків, коли в таких елементах наявні повзучо-втомні тріщини, які за дії циклічного навантаження з витримкою T_1 в циклі ростуть і досягають свого критичного розміру. Тут постає питання про розвиток таких дефектів (тріщин), їх кінетику і, взагалі, про період їх докритичного росту. Метою роботи є розроблення розрахункової моделі визначення періоду докритичного росту повзучо-втомних тріщин у рамах візків електровозів, яка враховувала б основні параметри навантаження, геометрію елемента конструкції та тріщини. **Методика.** Сформульовано розрахункову модель для визначення періоду докритичного росту повзучо-втомних тріщин в елементах конструкцій рами в умовах дії змінного в часі навантаження. Вона базується на першому законі термодинаміки стосовно механіки заповільненого руйнування тіл під час змінного навантаження та низькотемпературної повзучості, коли домінуюча роль при цьому відводиться періоду неусталеної повзучості (перша ділянка кривої повзучості). Низькотемпературна повзучість – це повзучість матеріалів за температур $T_0 < 0,5T_{\text{mp}}$, де T_{mp} – температура плавлення матеріалу. **Результати.** Отримано аналітичну формулу для визначення коефіцієнта інтенсивності напружень шкворневої балки з технологічним отвором. Показано, що за визначеними експериментально константами матеріалу з використанням запропонованих аналітичних залежностей можна легко визначати залишковий ресурс елементів рами візка. **Наукова новизна.** Запропоновано нову математичну модель для опису кінетики поширення повзучо-втомних тріщин у рамах візків електровоза за змінних у часі навантажень із різними їх часовими витримками та визначення на цій основі періоду докритичного росту тріщин. **Практична значимість.** Сформульована модель може слугувати основою інженерних методів розрахунку з визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій із тріщинами, що працюють за сумісної дії циклічного навантаження та неусталеної повзучості.

Ключові слова: рама візка локомотива; повзучо-втомна тріщина; залишкова довговічність; низькотемпературна повзучість; період докритичного росту повзучо-втомної тріщини; коефіцієнт інтенсивності напружень

Вступ

Вантажні і пасажирські електровози серії ВЛ [9, 10] становлять значну частину магістральних електровозів, що експлуатуються на вітчизняних електрифікованих залізничних дорогах. Однак відомо, що на сьогодні значна частина даного рухомого складу залізниць України експлуатується з перевищенням призначеного

строку служби. А тому для відвернення непередбачених аварій виникає потреба створення надійних методів оцінки залишкового ресурсу їх несучих елементів конструкцій.

Зміна рівня якісного стану рейкових шляхів, технічного обслуговування і умов експлуатації електровозів останнім часом все більше призводить до появ тріщин рам візків вантажних

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

електровозів, їх руйнування, а відтак і сходження з рейок. Рама візка електрорухомого складу (рис. 1) є основним несучим вузлом конструкції локомотива, який призначений для розміщення елементів тягового приводу, гальмівного обладнання і ресорної підвіски. Через раму візка здійснюється передача ваги кузова на колісні пари, вона сприймає також сили тяги і гальмування, що розвиваються кожною колісною парою, і передає їх на раму кузова, а потім на автозчепку.

Одним із основних елементів рами візка, який сприймає силу тяги і гальмування, є шкворневий брус коробчастого перерізу з двома технологічними отворами та конічним переходом вздовж висоти заглиблення, через який проходить шкворінь. Як показує практика, в процесі експлуатації рами візка зародження тріщин найчастіше відбувається в технологічних кругових отворах на нижній полиці шкворневої балки (рис. 1). Подальший ріст таких тріщин може призвести до руйнування балки, а відтак і до повного руйнування рами візка під час руху потяга. Таким чином, можна припускати, що шкворнева балка визначає ресурс рами візка локомотива. Виходячи з цього, постала задача оцінки довговічності візка залежно від розміру тріщини, яка виникла з технологічного отвору шкворневої балки, за умов низькотемпературної повзучості.

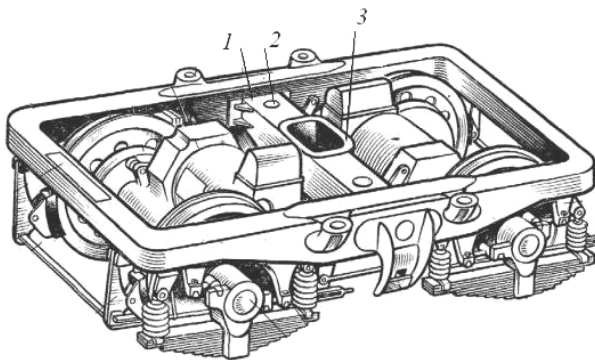


Рис. 1. Схема рами візка локомотива ВЛ-80:
1 – шкворнева балка; 2 – технологічні отвори;
3 – шкворневий отвір

Fig. 1. Scheme of bogie frame VL-80:
1 – truck bolster; 2 – technological holes; 3 – pivoted hole

На цей час оцінці ресурсу основних несучих конструкцій рухомого складу залізниць присвячено багато наукових праць. Так, наприклад, у [4] запропоновано методику для оцінки дов-

говічності залишкового ресурсу рам візків локомотива, яка побудована на базі коректованої гіпотези лінійного сумування втомних пошкоджень з використанням показників експлуатаційного навантаження і характеристик опору втомі натурних деталей після їх тривалої експлуатації. Викладено методики визначення строку служби та залишкового ресурсу ходових частин рухомого складу на базі стендових випробувань малої кількості деталей з різними термінами експлуатації [6].

Авторами праці [1] розроблено методи розв'язку прямих і обернених задач надійності рам візків вагонів електропоїздів з урахуванням випадковості навантаження та характеристик опору втомі і виконано числові дослідження характеристик надійності.

У [5] здійснено оцінювання залишкового ресурсу рам візків електровозів ВЛ-10 за допомогою 3-го розрахункового методу Серенсена, який передбачає розрахунок коефіцієнта перевантаження. На основі літературних даних про ВЛ-10 розробник визначив вихідні дані для розрахунку ймовірності виникнення втомних тріщин у найбільш напружених місцях рами.

Вагому частку наукових праць присвячено прогнозуванню та підвищенню втомної довговічності бокової рами візків вантажних вагонів [2, 3, 7, 8].

Однак у вищезгаданих працях запропоновані моделі оцінювання ресурсу рам візків електровозів ґрунтуються на стендових дослідженнях або числових методах. Аналітичних залежностей для цього в літературних джерелах не виявлено, особливо таких, що враховують повзучість.

Мета

Метою роботи є розроблення розрахункової моделі визначення періоду докритичного росту повзучо-втомних тріщин в рамах візків електровозів, яка враховувала б основні параметри навантаження, геометрію елемента конструкції і тріщини.

Методика

Під час руху локомотива на шкворневу балку рами візка діє постійна тягова сила P , яка збільшується (зменшується) за його старту (зупинки) (рис. 2). Час зупинки чи старту локомо-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

тива є набагато меншим за час його руху (тобто час навантаження і розвантаження поїзда), тому ними можемо знехтувати. Таким чином навантаження, що припадає на раму візка локомотива, можна моделювати циклічним навантаженням з витримкою T_1 в циклі в умовах дії низькотемпературного поля T_0 ($T_0 < 0,5T_{пл}$, $T_{пл}$ – температура плавлення матеріалу елемента конструкції), що забезпечує в основному процес повзучо-втомного руйнування (рис. 2). Тут T_1 – тривалість руху поїзда в тяговому режимі; T_2 – час уповільнення руху; T_3 – час стоянки; T_4 – час прискорення руху; $T_1 \gg T_2 + T_3 + T_4$. За навантаження, яке домінує в циклі T_1 , в шкворневій балці будуть зароджуватись і розвиватись повзучо-втомні тріщини.

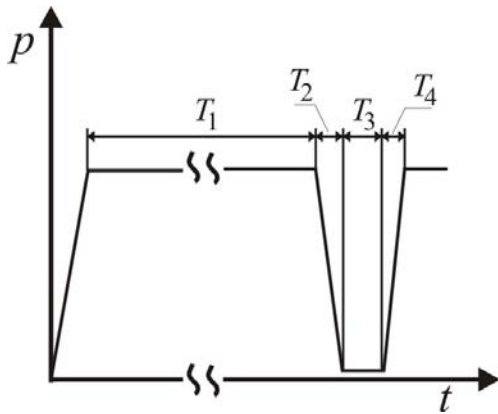


Рис. 2. Схема часової зміни в часі зовнішнього навантаження під час руху і зупинки поїзда

Fig. 2. Scheme of hours changes in time of the external load during the driving and stopping of trains

Таким чином, задача полягає у визначенні періоду докритичного росту повзучо-втомної тріщини (кількості циклів навантаження $N = N_*$), яка розміщена в шкворневій балці рами візка локомотива і виходить з технологічного отвору.

Розв'язування задачі виконаємо на основі запропонованої раніше аналогічної розрахункової моделі [11] для визначення періоду докритичного росту повзучо-втомних високотемпературних тріщин за змінного в часі навантаження. В основу моделі покладено принципи термодинаміки, а саме балансу енергетичних складових для елементарного акта поширення тріщини та балансу швидкостей їх зміни. Запишемо рівняння кінетики поширення повзучо-втомної тріщини у вигляді

$$dl/dN = \partial W_p / \partial N [\gamma_{fc} - \gamma_t]^{-1}, \quad (1)$$

за початкової і кінцевої умов

$$N = 0, \quad l(0) = l_0;$$

$$N = N_*(T_1), \quad l(N_*(T_1)) = l_*;$$

$$\gamma_t(l_*) = \gamma_{fc}. \quad (2)$$

Тут W_p – частина роботи пластичних деформацій, яка генерується самим тілом під час його розвантаження і статичного стиску зони передруйнування; $\gamma_t = \sigma_{0f} \delta_{tmax}$ – питома робота пластичних деформацій у зоні передруйнування за росту повзучо-втомної тріщини; $\gamma_{fc} = \sigma_{0f} \delta_{fc}$ – її критичне значення; δ_{tmax} – максимальне за цикл розкриття δ_t тріщини в її вершині за усередненого напруження σ_{0f} в зоні передруйнування; δ_{fc} – критичне значення δ_t ; l_0 – початковий розмір тріщини; l_* – граничний розмір тріщини (для цього випадку приймаємо наближення вершини втомної тріщини до ребра жорсткості, розміщеного на внутрішній стороні шкворневого бруса).

Енергію деформування W_p , що входить в рівняння (1) запишемо так [11]

$$W_p = \alpha_0 N \sigma_{0f} \left(\left([\delta_{tmax}(0,t) - \delta_{tmin}(0,t)]^2 - [\delta_{thmax}(0,t) - \delta_{thmin}(0,t)]^2 \right) \right), \quad (3)$$

де δ_{thmax} , δ_{thmin} – максимальне і мінімальне нижнє порогове значення розкриття δ_t тріщини в її вершині, за якого не відбувається повзучо-втомне руйнування; α_0 – константа, яка визначається експериментально.

Оскільки ми розглядаємо практичні часи витримок, то основну долю часу інкубаційного періоду займатиме неусталена повзучість (перша ділянка кривої повзучості [13]). Також відомо [13], що за відношення температури $T_0/T_{пл}$ від 0,05 до 0,3 деформація повзучості за розтягу змінюється пропорційно натуральному логарифму. Тоді на основі результатів праці [13] для першої ділянки діаграми повзучості розкриття зони передруйнування запишемо так

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$$\delta_{l_{\max}}(0, t) = \delta_{l_{\max}}(0, 0) + B \ln((t_0 + t)t_1^{-1}). \quad (4)$$

Тут B, t_1 – константи, які визначають експериментально; $\delta_{l_{\max}}(0, 0)$ – максимальне розкриття зони передруйнування на початку циклу навантаження; $B \ln((t_0 + t)t_1^{-1})$ – додаткове розкриття зони передруйнування за рахунок повзучості протягом циклу навантаження (надалі приймається, що $t_0 = 1$ год). З (4) легко бачити, що $B = \dot{\delta}_{l_{\max}}(0, 0) t_0$, де $\dot{\delta}_{l_{\max}}(0, 0)$ – швидкість розкриття у вершині тріщини за повзучості в зоні передруйнування.

Різницю розкриття тріщини у формулі (3) запишемо у вигляді

$$\delta_{l_{\max}}(0, t) - \delta_{l_{\min}}(0, t) = 0,5[\delta_{l_{\max}}(0, 0) + \dot{\delta}_{l_{\max}}(0, 0)t_0 \ln((t_0 + t)t_1^{-1})](1 - R)^2, \quad (5)$$

де R – коефіцієнт асиметрії циклу навантаження. Аналогічно, як це було запропоновано в працях [11, 12], швидкість розкриття тріщини повзучості $\dot{\delta}_{l_{\max}}(0, 0)$ можна подати такою залежністю

$$\dot{\delta}_{l_{\max}}(0, 0) = A_1 [\delta_{l_{\max}}(0, 0) \delta_{f_c}^{-1}]^m, \quad (6)$$

де A_1, m – характеристики низькотемпературної повзучості матеріалу, які визначаються із експерименту. Тоді з врахуванням цього і співвідношень (3), (5) рівняння (1) для визначення швидкості поширення макротріщини набуде вигляду

$$\frac{dl}{dN} = \frac{\alpha_0(1-R)^4}{4\sigma_{of}E} \left\{ \left[K_{l_{\max}}^2 + A_2 \left[\frac{K_{l_{\max}}^2}{K_{f_c}^2} \right]^m \times \ln\left(\frac{t_0 + T}{t_1}\right) \right]^2 - \left[K_{th}^2 + A_2 \left[K_{th}^2 K_{f_c}^{-2} \right]^m \times \ln\left(\frac{t_0 + T_1}{t_1}\right) \right]^2 \right\} (K_{f_c}^2 - K_{l_{\max}}^2)^{-1} \quad (7)$$

за наступних початкової і кінцевої умов

$$N = 0, \quad l(0) = l_0;$$

$$N = N_*(T_1), \quad l(N_*(T_1)) = l_*;$$

$$K_{l_{\max}}(l_*) = K_{f_c}, \quad (8)$$

де E – модуль Юнга; $K_{l_{\max}}$ – максимальне значення коефіцієнта інтенсивності напружень K_I в циклі; K_{f_c} – критичне значення K_I за циклічного навантаження; K_{th} – нижнє порогове значення K_I , за якого не проходить повзучо-втомне руйнування; $A_2 = A_1 t_0 \sigma_{of} E$.

Результати

Маючи швидкість росту повзучо-втомної тріщини, значення докритичного періоду легко знайти за залежністю

$$N_* = \frac{4\sigma_{of}E}{\alpha_0(1-R)^4} \int \left\{ \left[K_{l_{\max}}^2 + A_2 \left[K_{l_{\max}}^2 / K_{f_c}^2 \right]^m \times \ln\left(\frac{t_0 + T_1}{t_1}\right) \right]^2 - \left[K_{th}^2 + A_2 \left[K_{th}^2 / K_{f_c}^2 \right]^m \times \ln\left(\frac{t_0 + T}{t_1}\right) \right]^2 \right\}^{-1} (K_{f_c}^2 - K_{l_{\max}}^2) dl. \quad (10)$$

Для цього випадку значення коефіцієнта інтенсивності напружень визначаємо на основі праці [14] за формулою

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi l} F\left(\frac{l}{r}\right), \quad (9)$$

де $F\left(\frac{l}{r}\right)$ – протабульована безрозмірна поправкова функція.

За даними табличних значень функції $F\left(\frac{l}{r}\right)$ [14] її було апроксимовано методом найменших квадратів із високою точністю (R^2 не менше 0,999) за допомогою такої залежності (рис. 3)

$$F\left(\frac{l}{r}\right) = 1,29 \left(\frac{l}{r} + 0,535\right)^{-1,7} + 0,768. \quad (11)$$

Для побудови кількісних діаграм оцінки залишкового ресурсу балки з наявною повзучо-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

втомною тріщиною необхідно виконати додаткові експериментальні дослідження для визначення повзучо-втомних характеристик матеріалу рами з урахуванням терміну експлуатування візка, які необхідно закласти для розрахунків за отриманою аналітичною залежністю (10).

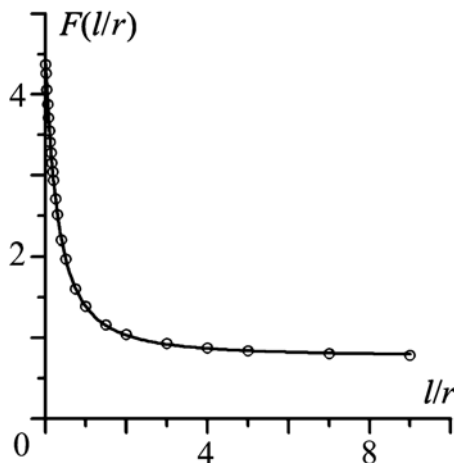


Рис. 3. Апроксимація методом найменших квадратів коефіцієнта інтенсивності напружень для тріщини біля кругового вирізу: *кружечки* – числовий розв’язок [14], *суцільна лінія* – залежність (11)

Fig. 3. Approximation with the smallest squares method of stress intensity factor for cracks near circular neckline:

circles – numerical solution [14], *solid line* – dependence (11)

Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано нову математичну модель для опису кінетики поширення повзучо-втомних тріщин у рамах візків електровоза за змінних у часі навантажень з різними їх часовими витримками і визначення на цій основі періоду докритичного росту тріщин. В основу моделі покладено перший закон термодинаміки для елементарного акта руйнування за такого виду навантажень.

Сформульована модель може слугувати основою інженерних методів розрахунку з визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій із тріщинами, що працюють за сумісної дії циклічного навантаження і неусталеної повзучості.

Висновки

Побудована розрахункова модель для оцінки періоду росту в рамі візка локомотива повзучо-

втомних тріщин за циклічно-змінних навантажень з різними часовими витримками у циклі і визначення на цій основі залишкового ресурсу рами візка. Модель урахує особливості експлуатування локомотива в тяговому режимі. Вона передбачає мінімальну кількість експериментальних досліджень з визначення констант матеріалу і може бути покладена в основу методик розрахунку залишкового ресурсу силових елементів рухомого складу залізниць, під час використання їх у виробничих умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жовдак, В. А. Прогнозирование надежности рам тележек вагонов электропоездов / В. А. Жовдак, А. Б. Белоцерковский // Вестн. НТУ «ХПИ». Динаміка та міцність машин : сб. науч. тр. – Харьков, 2005. – № 47. – С. 61–70.
2. Излом боковой рамы тележки грузового вагона. Анализ технологии производства, пути устранения дефектов / А. Монастырский, В. Бубнов, С. Котенко, В. Балакин // САПР и графика. – 2013. – № 1. – С. 95–99.
3. Особенности рамы тележки грузового вагона и усталостная выносливость / А. Л. Голубенко, Л. А. Губачева, А. А. Андреев, С. Д. Мокроусов // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2013. – № 9 (1). – С. 7–16.
4. Оценка долговечности и остаточного ресурса рам тележек локомотивов / Б. Б. Бунин, Э. С. Оганьян, Т. М. Пономаева, В. Г. Шевченко // Тяжелое машиностроение. – 2007. – № 11. – С. 31–33.
5. Оцінювання залишкового ресурсу рам візків електровозів ВЛ-10 / В. Леоніць, Б. Шульгін, А. Лукашевич, Л. Чаус // Вісн. Тернопіл. нац. ун-ту. – 2011. – Спецвип., ч. 2. – С. 29–34.
6. Прогнозирование остаточного ресурса ходовых частей подвижного состава, исчерпавших свой ресурс / А. В. Донченко, Л. С. Ольгард, С. В. Бондарев, Л. Г. Волков // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 15. – С. 83–87.
7. Самошкин, С. Л. Исследование несущих элементов тележек модели 18-100 грузовых вагонов / С. Л. Самошкин, А. А. Хоменко, А. А. Виноградов // Тяжелое машиностроение. – 2007. – № 9. – С. 23–25.
8. Султан, А. В. Исследование усталостной прочности рамы тележки электровоза ДСЗ методом конечно-элементного моделирования / А. В. Султан, Б. Н. Товт // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 30. – С. 230–234.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

9. Электровозы ВЛ-10 и ВЛ-10у. Руководство по эксплуатации / под ред. О. А. Кикнадзе. – Москва : Транспорт, 1981. – 519 с.
10. Электровоз ВЛ-11. Руководство по эксплуатации / под ред. Г. И. Чиракадзе и О. А. Кикнадзе. – Москва : Транспорт, 1983. – 464 с.
11. Andreykiv, O. E. Estimation of the period of initiation and propagation of creep-fatigue cracks in thin-walled structural elements / O. E. Andreykiv, I. Ya. Dolins'ka, and N. V. Yavorska // *Materials Science*. – 2011. – Vol. 47. – Iss. 3 – P. 273–283. doi: 10.1007/s11003–011–9393–6
12. Andreykiv, O. E. Strength of thin-walled structural elements with cracks under the conditions of creep / O. E. Andreykiv, N. B. Sas // *Materials Science*. – 2007. – Vol. 43. – Iss. 2. – P. 174–182. doi: 10.1007/s11003–007–0020–5
13. Garofalo, F. Fundamentals of creep and creep-rupture in metals / F. Garofalo. – New York ; London : Mac Millan Company, 1970. – 343 p.
14. Stress intensity factors handbook : in 2 Vol. / Ed. by Y. Murakami. – Tokyo : Pergamon Books LTD, 1982. – 1014 p.

В. Р. СКАЛЬСКИЙ¹, И. Я. ДОЛИНСКАЯ^{2*}, Д. В. РУДАВСКИЙ^{3*}, Р. Я. ЯРЕМА⁴,
В. Р. БАС^{5*}

¹Отдел акустико-эмиссионного диагностирования элементов конструкций, Физико-механический институт имени Г. В. Карпенко НАН Украины, ул. Научная, 5, Львов, Украина, 79060, тел. +38 (032) 263 12 64, эл. почта skal@ipm.lviv.ua, ORCID 0000-0002-3799-0883

^{2*}Отдел акустико-эмиссионного диагностирования элементов конструкций, Физико-механический институт имени Г. В. Карпенко НАН Украины, ул. Научная, 5, Львов, Украина, 79060, тел. +38 (032) 229 68 75, эл. почта ira_dolinska@ukr.net, ORCID 0000-0003-1143-8895

^{3*}Отдел акустико-эмиссионного диагностирования элементов конструкций, Физико-механический институт имени Г. В. Карпенко НАН Украины, ул. Научная, 5, Львов, Украина, 79060, тел. +38 (032) 229 65 46, эл. почта gudavskyy@gmail.com, ORCID 0000-0001-5541-3003

⁴ЧАО «Львовский локомотиворемонтный завод», ул. Железнодорожная, 1а, Львов, Украина, 79018, тел. +38 (032) 233 30 25, эл. почта general@lvivlrz.com, ORCID 0000-0002-1560-6078

^{5*}ЧАО «Львовский локомотиворемонтный завод», ул. Железнодорожная, 1а, Львов, Украина, 79018, тел. +38 (032) 233 02 96, эл. почта v_bas@mail.ua, ORCID 00–0002–8308–8807

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ ЛОКОМОТИВА С УЧЕТОМ ПОЛЗУЧЕСТИ

Цель. Проблема определения остаточного ресурса элементов рамы тележки электровозов имеет большое значение для прогнозирования их безопасной работы и избежания возможных аварий на пути следования. Особенно это касается случаев, когда в таких элементах имеются усталостно-ползучие трещины, которые при действии циклической нагрузки с выдержкой T_1 в цикле растут и достигают своего критического размера. Здесь возникает задача изучения развития таких дефектов (трещин), то есть получения данных об их кинетике, что определяет период их докритического роста. Целью работы является разработка расчетной модели определения периода докритического роста ползуче-усталостных трещин в рамах тележек электровозов, которая учитывала бы основные параметры нагрузки, геометрию элемента конструкции и трещины. **Методика.** Сформулирована расчетная модель для определения периода докритического роста ползуче-усталостных трещин в элементах конструкции рамы в условиях действия переменного во времени нагружения. Она базируется на первом законе термодинамики относительно механики замедленного разрушения тел при переменной нагрузке и низкотемпературной ползучести, когда доминирующая роль при этом отводится периоду неустановившейся ползучести (Первый участок кривой ползучести). Низкотемпературная ползучесть – это ползучесть материалов при температурах $T_0 < 0,5T_{mp}$, где T_{mp} – температура плавления материала. **Результаты.** Получена аналитическая формула для определения коэффициента интенсивности напряжений шкворневой балки с технологическим отверстием. Показано, что по экспериментально определенным константам материала с использованием предложенных аналитических зависимостей можно легко определять остаточный ресурс элементов рамы тележки. **Научная новизна.** Предложена новая математическая модель для описания кинетики распространения ползуче-усталостных трещин в рамах тележек электровоза при переменных во времени нагрузках с различными их часовыми выдержками и определение на этом основании периода их докритического роста. **Практическая значимость.** Предложенная в работе модель может служить основой инженерных методов расчета остаточного ресурса элементов конструкций с трещинами, работающих при совместном действии циклической нагрузки и неустановившейся ползучести.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Ключевые слова: рама тележки локомотива; ползуче-усталостная трещина; остаточная долговечность; низкотемпературная ползучесть; период докритического роста; ползуче-усталостная трещина; коэффициент интенсивности напряжений

V. R. SKALSKYI¹, I. YA. DOLINSKA^{2*}, D. V. RUDAVSKYY^{3*}, R. YA. YAREMA⁴,
V. R. BAS^{5*}

¹Dep. «Acoustic Emission Diagnostics of Structural Elements», Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Naukova St., 5, Lviv, Ukraine, 79060, tel. +38 (032) 263 12 64, e-mail skal@ipm.lviv.ua, ORCID 0000-0002-3799-0883

^{2*}Dep. «Acoustic Emission Diagnostics of Structural Elements», Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Naukova St., 5, Lviv, Ukraine, 79060, tel. +38 (032) 229 68 75, e-mail ira_dolinska@ukr.net, ORCID 0000-0003-1143-8895

^{3*}Dep. «Acoustic Emission Diagnostics of Structural Elements», Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Naukova St., 5, Lviv, Ukraine, 79060, tel. +38 (032) 229 65 46, e-mail rudavskyy@gmail.com, ORCID 0000-0001-5541-3003

⁴JSC «Lviv Locomotive Repair Plant», Zaliznychna St., 1a, Lviv, Ukraine, 79018, tel. +38 (032) 233 30 25, e-mail general@lvivlrz.com, ORCID 0000-0002-1560-6078

^{5*}JSC «Lviv Locomotive Repair Plant», Zaliznychna St., 1a, Lviv, Ukraine, 79018, tel. +38 (032) 233 02 96, e-mail v_bas@mail.ua, ORCID 0000-0002-8308-8807

ESTIMATION MODEL OF RESIDUAL LIFE-TIME OF LOCOMOTIVE FRAME BOGIE WITH ALLOWANCE FOR CREEP

Purpose. The problem of determining the residual life of frame bogie elements of locomotives is a great importance for predicting their work safely and avoidance potential failures on the track. This especially concern cases when such elements have creep-fatigue cracks which grow under action of cyclic loading with excerpts T_1 in the cycle and reach their critical size. Here the question of the propagation of such defects (cracks) arises, their kinetics and about the period of subcritical cracks growth. The aim is to develop a calculation model for determination the period of subcritical creep-fatigue cracks growth in the bogies frames of electric locomotive. The model takes into account the basic parameters of load, geometry of the construction element and cracks. **Methodology.** The calculation model for determination the period of subcritical creep-fatigue cracks growth in structural elements of frame under conditions of variable load time has been formulated. It is based on the first law of thermodynamics concerning to mechanics of solids slow fracture at low temperature creep and variable loadings. It is assumed that the period of unsteady creep dominates here (the first section of the creep curve). Low-temperature creep is creep of materials at temperatures $T_0 < 0,5T_{mp}$, where T_{mp} – the melting point of the material. **Findings.** The analytical formula for the determination of the stress intensity factor of truck bolster with technological hole has been obtained. It is shown that by experimentally established constants of the material using the proposed analytical relations can easily determine residual resource of the bogie frame elements. **Originality.** The new mathematical model for describing the kinetics of creep-fatigue cracks growth in the frames bogies of electric locomotive under variable in time loadings with various time excerpts and on this base the period determination of subcritical crack growth has been proposed. **Practical value.** Formulated model can serve as a basis for engineering calculation methods to determine the residual life of structural elements with cracks, working on joint action of cyclic loading and unsteady creep.

Keywords: bogie frame of the locomotive; creep-fatigue crack; residual life-time; low temperature creep; period of subcritical creep-fatigue crack growth; stress intensity factor

REFERENCES

1. Zhovdak V.A., Belotserkovskiy A.B. Prognozirovaniye nadezhnosti ram telezhok vagonov elektropoyezdov [Reliability prediction of bogie frames of electric trains]. *Sbornik nauchnykh trudov. Vestnik natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta Kharkovskogo politekhnicheskogo universiteta: Dynamika ta mitsnist mashyn* [Proc. of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»: Dynamics and machines strength], 2005, no. 74, pp. 61-70.
2. Monastyrskiy A., Bubnov V., Kotenko S., Balakin V. Izlom bokovoy ramy telezhki gruzovogo vagona. Analiz tekhnologii proizvodstva, puti ustraneniya defektov [Failure of side bogie frame in the freight car. Analysis of manufacturing technology, ways of defects removal]. *SAPR i grafika – CAD and graphics*, 2013, no. 1, pp. 95-99.
3. Golubenko A.L., Gubacheva L.A., Andreyev A.A., Mokrousov S.D. Osobennosti ramy telezhki gruzovogo vagona i ustalostnaya vynoslivost [Features of bogie frame in the freight car and fatigue endurance]. *Visnyk Shidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni V. Dalia* [Bulletin of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University], 2013, no. 9 (1), pp. 7-16.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

4. Bunin B.B., Oganyan Ye.S., Ponomayeva T.M., Shevchenko V.H. Otsenka dolgovechnosti i ostatochnogo resursa ram telezhek lokomotivov [Estimation of lifetime and residual resource of bogie frames in locomotives]. *Tyazheloye mashinostroeniye – Heavy Engineering*, 2007, no. 11, pp. 31-33.
5. Leonets V., Shulhinov B., Lukashevych A., Chaus L. Otsiniuvannia zalyshkovoho resursu ram vizkiv elektrovoziv VL-10 [Estimation of residual resource of bogie frames in the electric locomotives VL-10]. *Visnyk Ternopil'skoho natsionalnoho universytetu – Bulletin of Ternopil National University*, 2011, special issue, no. 2, pp. 29-34.
6. Donchenko A.V., Olgard L.S., Bondarev S.V., Volkov L.G. Prognozirovaniya ostatochnogo resursa khodovykh chastei podvizhnogo sostava, ischerpavshikh svoi resurs [Residual resource prediction of running parts of the rolling stock which have exhausted their resource]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2007, issue 15, pp. 83-87.
7. Samoshkin S.L., Khomenko A.A., Vinogradov A.A. Issledovaniye nesushchikh elementov telezhek modeli 18-100 gruzovykh vagonov [Investigation of bogie supporting elements, model 18-100 of the freight cars]. *Tyazheloye mashinostroeniye – Heavy Engineering*, 2007, no. 9, pp. 23-25.
8. Sultan A.V., Tovt B.N. Issledovaniye ustalostnoy prochnosti rami telezhki elektrovoza DS3 metodom konechno-elementnogo modelirovaniya [Investigation of the fatigue strength of the bogie frame in the electric locomotive of DC3 by finite element modeling]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 30, pp. 230-234.
9. Kiknadze O.A. *Elektrovoz VL10 and VL10u. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Electric locomotive VL11. Operations manual]. Moscow, Transport Publ., 1981. 519 p.
10. Chirakadze G.I., Kiknadze O.A. *Elektrovoz VL11. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Electric locomotive VL11. Operations manual]. Moscow, Transport Publ., 1983. 464 p.
11. Andreykiv O.E., Dolinska I.Ya., Yavorska N.V. Estimation of the period of initiation and propagation of creep-fatigue cracks in thin-walled structural elements. *Materials Science*, 2011, issue 47, no. 3, pp. 273–283. doi: 10.1007/s11003–011–9393–6.
12. Andreykiv O.E., Sas N.B. Strength of thin-walled structural elements with cracks under the conditions of creep. *Materials Science*, 2007, issue 43, no. 2, pp. 174–182. doi: 10.1007/s11003–007–0020–5.
13. Garofalo F. *Fundamentals of creep and creep-rupture in metals*, New York-London, Mac Millan Company Publ., 1970. 343 p.
14. Murakami Y. *Stress intensity factors handbook*. Stress intensity factors handbook. In 2 volumes. Tokyo, Pergamon Books LTD Publ., 1982. 1014 p.

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. О. Є. Андрейківим (Україна); д.т.н., проф. В. Л. Горобцем (Україна)

Надійшла до редколегії 22.10.2014

Принята до друку 19.12.2014