

УДК 620.19

## ПОШИРЕННЯ ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ НА ПОВЕРХНІ БОКОВИНИ РАМИ ВІЗКА ВАНТАЖНОГО ВАГОНА ЗА НЕРЕГУЛЯРНОГО ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Д. В. РУДАВСЬКИЙ, М. С. ШЕФЕР, Ю. І. КАНЮК

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

Досліджено кінетику поширення втомної тріщини на поверхні бокової рами залізничного вагона із урахуванням стохастичної природи експлуатаційного навантаження. Виявлено її залежність від початкової геометрії тріщини та знайдено для заданих умов навантаження форму півеліптичного контуру втомної тріщини із найбільшою швидкістю поширення у глибину стінки рами. Сформульована математична модель придатна для оцінювання залишкової довговічності бокової рами із поверхневим тріщиноподібним дефектом заданої початкової площі.

**Ключові слова:** бокова рама, втомна тріщина, коефіцієнт інтенсивності напружень, функція розподілу імовірності, залишкова довговічність.

Литі бокові рами візків вантажних вагонів виготовляють із низьколегованих сталей марок 20ГФЛ, 20ГЛ чи 20ГТЛ. Вимоги до їх виробництва регламентують відповідні нормативні документи, зокрема технічні умови заводу-виробника, за умов дотримання яких експлуатаційний термін литих рам близько 30 років. Однак на практиці вони частіше руйнуються за значно коротший термін і, згідно зі статистичними даними, найбільше – у перші 2–3 роки експлуатації.

Пов'язано це в основному із ливарними дефектами у небезпечних зонах литої балки, переважно біля концентраторів механічних напружень, що сприяють зародженню втомних тріщин навіть за нормованих режимів навантаження (рис. 1).

Рис. 1. Схема розташування перерізів у боковій рамі візка за зонами руйнування:  
1 – переріз внутрішнього кута буксової порожнини;  
2 – похилого поясу з буксовим упором; 3 – ресорної порожнини.

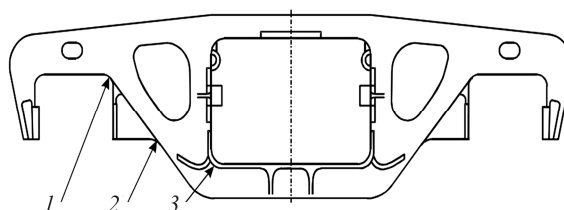


Fig. 1. Scheme of the fracture sections location in the freight wagon side frame:  
1 – section of the box opening inner corner; 2 – section of the inclined belt with the box stop;  
3 – section of the springs cell.

Під час втомного руйнування металоконструкцій виділяють дві основні стадії:  $N_i$  – зародження втомної тріщини (інкубаційний період) та  $N_s$  – її ріст до критичних розмірів, яку визначає вже залишковий ресурс елемента конструкції із тріщиною (рис. 2). Згідно з існуючими стандартами ресурсних випробувань литих деталей візків залізничних вагонів визначають лише першу стадію, тобто інкубаційний період, ґрунтуючись на правилі лінійного накопичення втомних пошкоджень Пальмгрена–Майнера [1] за час експлуатації. Прогнозуванню надійності та довговічності бокових рам за таким підходом присвячено чимало публікацій [2–4].

Контактна особа: Ю. І. КАНЮК, e-mail: kaniukyuri@gmail.com

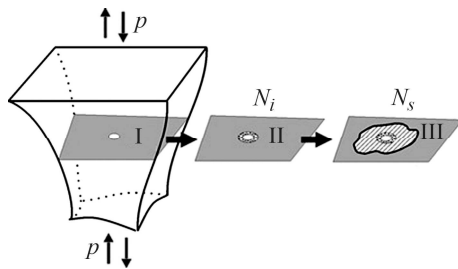


Рис. 2. Основні стадії розвитку тріщиноподібного дефекту: I – утворення мікропорожнини; II – інкубаційний період; III – докритичний ріст макротріщини.

Fig. 2. Basic stages of the crack-like defect growth: I – microcavity formation; II – latent period; III – macrocrack subcritical growth.

Сьогодні практично відсутні ефективні розрахункові методики оцінювання залишкової довговічності литої рами для другої стадії (рис. 2). Однак на основі існуючих можна було б визначити максимально допустимі розміри тріщин та тріщиноподібних дефектів, обґрунтувати періодичність відповідних діагностичних заходів, щоб уникнути непередбаченого руйнування литої рами.

Мета цього дослідження – побудувати нову математичну модель росту поверхневої втомної тріщини та створити на її основі розрахункову методику оцінювання залишкової довговічності литої бокової рами візка 18-100 вантажного вагона із урахуванням нерегулярного циклічно-змінного навантаження.

**Формулювання моделі.** За результатами розрахунків напружено-деформованого стану методом скінченних елементів виявлено значну нерівномірність розподілу механічних напружень у боковій рамі, що також підтверджують відповідні експериментальні дослідження [5–7]. Згідно з ними найчастіше тріщини зароджуються та поширюються у кутах буксових порожнин, де еквівалентні механічні напруження можуть досягати 100 МПа (див. рис. 1). Найтипівші поверхневі дефекти, які тут виявляють, достатньо близькі за формою до півеліптичної тріщини (рис. 3).

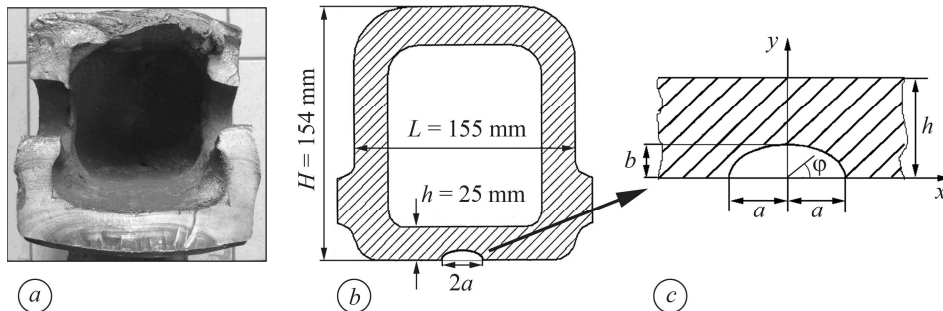


Рис. 3. Злам бічної рами із втомною тріщиною в перерізі внутрішнього кута буксової порожнини (a) та модельне зображення цього перерізу із півеліптичною тріщиною (b, c).

Fig. 3. Cracked side frame fatigue fracture at the box opening inner corner cross-section (a) and model representation of this cross-section with a semielliptical crack (b, c).

Проаналізуємо ріст такої поверхневої півеліптичної втомної тріщини за дії реального експлуатаційного навантаження. Нехай  $a_0$  та  $b_0$  – початкові розміри тріщини, а  $h$  – товщина стінки рами у досліджуваному перерізі (рис. 3b, c). Вважаємо (рис. 3a), що під час росту контур втомної тріщини залишається плоским та зберігає форму, близьку до півеліптичної. Тоді залежність довжини його півосей від кількості циклів навантаження  $N$  можна отримати із розв’язку системи двох звичайних диференціальних рівнянь у двох точках контуру, що відповідають великій та малій півосям ( $\varphi = 0$ ,  $\varphi = \pi/2$ ) (рис. 3c):

$$\begin{cases} \frac{da}{dN} = V(K_{I\max}(a, b, \varphi = 0)), \\ \frac{db}{dN} = V(K_{I\max}(a, b, \varphi = \pi/2)), \end{cases} \quad (1)$$

де  $K_{I\max}$  – максимальне значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) у відповідних точках контуру тріщини. Початкова умова до системи рівнянь (1) має вигляд

$$a = a_0, \quad b = b_0 \quad \text{при} \quad N = 0. \quad (2)$$

Кінетику поширення плоских втомних макротріщин досліджували багато авторів [8–10]. Зокрема, виявили [9, 10], що енергетичний підхід механіки руйнування матеріалів – один із найефективніших для моделювання росту втомних макротріщин. На основі відомих результатів [10] швидкість росту  $V$  півосей  $a$  та  $b$  контуру тріщини можна подати так:

$$V_a(a, b) = \frac{0,05\sigma_0^{-2}(1-R)^4 K_{I\max}^4(a, b, 0)}{\alpha K_{Ic}^2 - K_{I\max}^2(a, b, 0)},$$

$$V_b(a, b) = \frac{0,05\sigma_0^{-2}(1-R)^4 K_{I\max}^4(a, b, \pi/2)}{\alpha K_{Ic}^2 - K_{I\max}^2(a, b, \pi/2)}, \quad (3)$$

де  $R$  – асиметрія циклу навантаження;  $\sigma_0$  – модельне значення границі плинності матеріалу;  $K_{Ic}$  – його циклічна тріщиностійкість;  $\alpha$  – експериментальна константа матеріалу.

Методом граничної інтерполяції КІН для тіла із тріщиною у кожній точці її контуру можна наближено подати так [8]:

$$K_I(a, b, \varphi) = \frac{\sigma_a \sqrt{\pi b}}{E(k)} \left( \cos^2 \varphi + \kappa^2 \sin^2 \varphi \right)^{1/4} f_1(\varepsilon, \kappa) f_2(\varepsilon, \varphi), \quad (4)$$

де  $\sigma_a$  – амплітуда нормальних напружень у перерізі площини тріщини (рис. 3с),

$$\varepsilon = b/h; \quad \kappa = b/a; \quad f_1(\varepsilon, \kappa) = \left( 1 + \frac{0,12}{1 + \kappa^2} - \frac{E(k)}{\sqrt{\kappa}} \right) \exp\left( -\frac{1,48\varepsilon^2}{1 + 6\kappa^2} \right) + \frac{E(k)}{\sqrt{\kappa}}$$

$f_2(\varepsilon, \varphi) = 1 + (0,1 + 0,53\varepsilon^3)(2\varphi/\pi)^3$  – безрозмірні функції форми;

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi, \quad k^2 = 1 - (b/a)^2 \text{ – еліптичний інтеграл другого роду.}$$

**Розрахунок параметрів експлуатаційного навантаження.** Реально циклічне навантаження бічної рами під час експлуатації нерегулярне та має стохастичний характер. Однак, володіючи необхідними статистичними даними, його із достатньою точністю можна описати за амплітудним спектром, визначеним за деякий встановлений проміжок часу, наприклад, за один рік. Зокрема, функцію розподілу імовірності амплітуд нормальних напружень  $\sigma_a$  у небезпечних перерізах бічної рами добре описує розподіл Релея [11]:

$$F(\sigma_a) = 1 - \exp\left( -\frac{\sigma_a^2}{2S_a^2} \right), \quad (5)$$

де  $S_a = 14$  МПа – стандартне (середньоквадратичне) відхилення випадкової величини  $\sigma_a$  під час навантаження бічної рами.

Використовуючи функцію  $F(\sigma_a)$ , можна за допомогою відповідного алгоритму розкласти нерегулярне циклічне експлуатаційне навантаження на скінченну кількість регулярних із визначеною для кожного кількості циклів за постійної амплітуди. Суть алгоритму ось у чому.

Розбиваємо рівномірно діапазон зміни амплітуд від мінімального до максимального значення на задану кількість  $N$  підінтервалів. Далі за функцією (5) ви-

значаємо кількість попадань у кожний підінтервал усередненого за ним значення амплітуди. Імовірність  $P_i$  попадання амплітуди  $\sigma_a$  в  $i$ -й інтервал

$$P_i = \int_{M_i}^{M_{i+1}} f(\sigma_a) d\sigma_a,$$

де  $f(\sigma_a)$  – функція щільності розподілу імовірності амплітуд напружень  $\sigma_a$ ;  $M_i, M_{i+1}$  – початок і кінець  $i$ -го підінтервалу. Звідси кількість циклів вже регулярного навантаження у кожному підінтервалі

$$N_{P_i} = P_i \cdot v_b,$$

де  $v_b = 12 \cdot 10^6$  – загальна кількість циклів у річному блоці навантаження бічної рами [11].

Отже, за сформульованим алгоритмом реальне навантаження бічної рами під час експлуатації можна замінити скінченною кількістю блоків регулярного циклічно-змінного із визначеною кількістю циклів для кожного значення амплітуди зі знайденого амплітудного спектра.

**Аналіз результатів розрахунку кінетики росту втомної тріщини.** Для цього використовували програмне забезпечення власного розроблення. На першому етапі роботи програми будували спектр амплітуд нерегулярного циклічно-го навантаження. Далі запускали програмний модуль побудови числового розв'язку системи звичайних диференціальних рівнянь (1) методом Рунге–Кутта [12], який викликали по черзі для кожного блока регулярного навантаження за порядком спадання усереднених значень амплітуд у сформованому амплітудному спектрі. Розраховані на черговому блоці регулярного навантаження кінцеві значення півосей  $a$  та  $b$  півеліптичного фронту втомної тріщини слугували початковими умовами для розрахунку на наступному блоці, і так далі.

Щоб оцінити за побудованою розрахунковою моделлю залишкову довговічність бічної рами, необхідно знати початкові розміри тріщиноподібного дефекту. Однак широкозастосовувані методи технічної діагностики, зокрема акустичні (акустичної та магнетопружної акустичної емісії, ультразвуку), в основному коректно оцінюють місце розташування дефекту та його площу [13, 14].

Тому за початковий параметр приймали деяке вихідне значення  $S_0$  площі виявленого тріщиноподібного дефекту півеліптичної форми. Далі, задавши початкове мінімальне значення його півосі  $b_0$ , задавали відповідне значення осі  $a_0$ , визначивши його через площу  $S_0$ , та розраховували кінетику росту тріщини до критичних розмірів. Повторювали це, збільшуючи значення  $b_0$  із заданим кроком до деякого граничного. Тоді серед усіх розрахованих так траєкторій росту тріщини за однаковий період часу вибирали найнебезпечнішу, тобто таку, коли тріщина досягає найбільшої глибини (піввісь  $b$  – максимальна). А відповідне до такої траєкторії початкове співвідношення півосей  $b_0/a_0$  визначає для заданих умов найнебезпечнішу початкову форму поверхневої тріщини із площею  $S_0$ .

Обчислювали за таких значень механічних характеристик матеріалу бічної рами [15]:  $\sigma_0 = 350$  МПа;  $K_{Ic} = 70$  МПа·м<sup>1/2</sup>; експериментальну константу  $\alpha = 5$  визначали методом найменших квадратів, використовуючи експериментальні кінетичні діаграми втомного росту тріщини [16]; асиметрію циклів навантаження  $R$  приймали нульовою. Результати розрахунків за початкової площі поверхневої тріщини  $S_0 = 100$  мм<sup>2</sup> та початкової півосі  $b_0 = 3$  мм наведено на рис. 4 і 5.

Виявили (рис. 4b), що максимальної глибини за цей період експлуатації втомна тріщина досягає за початкового співвідношення її півосей  $b_0/a_0 \approx 1$  (рис. 5).

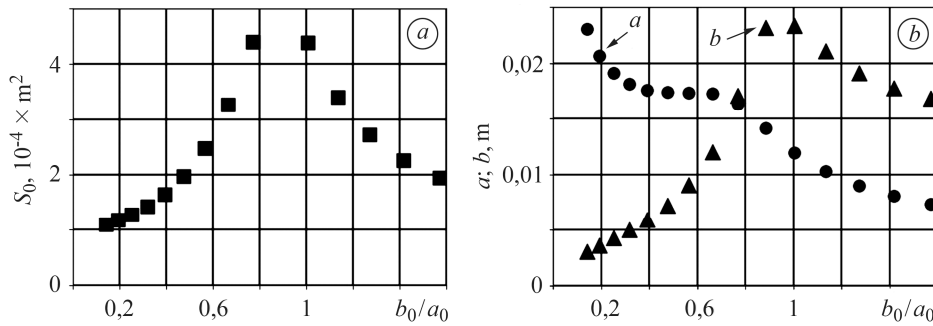
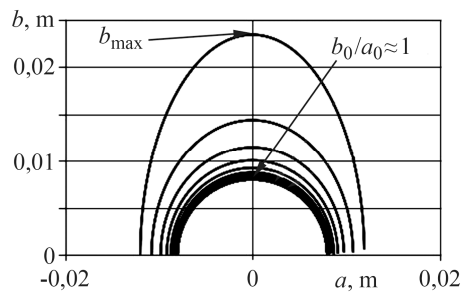


Рис. 4. Розраховані значення площі (а) та півосей (b) поверхневої півеліптичної тріщини через три роки роботи рами в експлуатаційному режимі для різних початкових співвідношень  $b_0/a_0$ .

Fig. 4. Calculated values of the area (a) and semi-axes (b) of the surface semielliptic crack after 3 years frame operation for the different initial ratios  $b_0/a_0$ .

Рис. 5. Кінетика росту поверхневої втомної тріщини за розрахованого в даних умовах навантаження екстремального співвідношення її півосей  $b_0/a_0 \approx 1$ .

Fig. 5. Kinetics of the surface fatigue crack growth for calculated extreme initial ratio  $b_0/a_0 \approx 1$  under given loading conditions.



## ВИСНОВКИ

Сформульовані розрахункові алгоритми дають можливість прогнозувати вплив нерегулярного циклічного навантаження на ріст поверхневої втомної тріщини в елементах ходової частини рухомого складу залізничного транспорту. Побудовану математичну модель росту втомної тріщини на поверхні бокової рами візка вагона із урахуванням стохастичної природи її навантаження можна закласти в розрахункову методику оцінювання залишкової довговічності рами під час експлуатації. Виявлено залежність кінетики розвитку поверхневої тріщини від її початкової геометрії та знайдено для заданих умов навантаження форму півеліптичного контуру втомної тріщини, що із найбільшою швидкістю поширюється у глибину стінки рами.

**РЕЗЮМЕ.** Исследована кинетика распространения усталостной трещины на поверхности боковой рамы железнодорожного вагона с учетом стохастической природы ее эксплуатационного нагружения. Выявлено ее зависимость от начальной геометрии такой трещины и найдено для заданных условий нагружения форму полуэллиптического контура усталостной трещины, которая с наибольшей скоростью распространяется в глубину стенки рамы. Сформулированную математическую модель можно использовать при построении методики оценки остаточной долговечности боковой рамы с поверхностным трещиноподобным дефектом заданной начальной площади.

**Ключевые слова:** боковая рама, усталостная трещина, коэффициент интенсивности напряжений, функция распределения вероятности, остаточный ресурс.

**SUMMARY.** The kinetics of fatigue crack propagation at the surface of the railway car side frame is studied taking into account the stochastic nature of its operational loading is investigated. Significant dependence of the surface crack kinetics on its initial geometry is found and for the given loading conditions the shape of the semi-elliptic profile of the fatigue crack with the

highest growth rate into the frame wall depth is found. The mathematical model formulated in the paper can be used for estimating the residual life of the side frame with a surface crack-like defect of a given initial area.

**Keywords:** *side frame, fatigue crack, stress intensity factor, probability distribution function, residual life.*

1. *Серенсен С. В., Козаев В. П., Шнейдерович Р. М.* Несущая способность и расчет деталей машин на прочность: руководство и справочное пособие. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
2. *Перспективы* создания сварных конструкций несущих элементов тележки грузового вагона / О. В. Махненко, Г. Ю. Сапрыкина, И. В. Мирзов, А. Д. Пустовой // Автомат. сварка. – 2014. – № 3. – С. 36–42.
3. *Расчет* на усталость сварных соединений несущих элементов тележки грузового вагона / Л. М. Лобанов, О. В. Махненко, Г. Ю. Сапрыкина, А. Д. Пустовой // Автомат. сварка. – 2014. – № 10. – С. 32–36.
4. *Сенько В. И., Пастухов И. Ф., Пастухов М. И.* Оценка остаточного ресурса литых деталей тележек грузовых вагонов по результатам испытаний образцов на выносливость // Вісник Дніпропетровськ. нац. ун-ту залізн. транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 15. – С. 126–130.
5. *Лукин В. В., Бельский А. О.* Расчет боковой рамы и надрессорной балки тележки грузового вагона методом конечных элементов // Изв. Транссиба. – 2013. – №1(13). – С. 7–12.
6. *Прогнозирование* остаточного ресурса ходовых частей подвижного состава, исчерпавших свой ресурс / А. В. Донченко, Л. С. Ольгард, С. В. Бондарев, Л. Г. Волков // Вісник Дніпропетровськ. нац. ун-ту залізн. транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 15. – С. 83–87.
7. *Shukunov O. A.* Three-element bogie side frame strength // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровськ. нац. ун-ту залізн. транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2017. – № 1. – С. 183–193.
8. *Андрейкив А. Е., Дарчук А. И.* Усталостное разрушение и долговечность конструкций. – К.: Наук. думка, 1992. – 184 с.
9. *Механика* разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. – Т. 4: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин, Н. А. Махутов, М. М. Стадник. – К.: Наук. думка, 1990. – 680 с.
10. *Рудавський Д. В.* Оцінювання залишкової довговічності тривимірного твердого тіла із плоскою тріщиною за циклічного навантаження // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – **51**, № 3. – С. 46–54.  
(*Rudavs'kyi D. V.* Evaluation of the residual life of a three-dimensional solid body weakened by a plane fatigue crack under cyclic loading // Materials Science. – 2015. – **51**, № 3. – P. 348–357.)
11. *Лагерев И. А.* Оценка усталостной прочности и живучести боковой рамы литой тележки грузового вагона // Науч.-техн. вестник Брянск. гос. ун-та. – 2017. – №4. – С. 374–380.
12. *Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М.* Численные методы. – М.: Бином, 2001. – С. 363–375.
13. *Назарчук З. Т., Скальський В. Р.* Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Наук.-техн. пос. у 3-х т. – Т. 2: Методологія акустико-емісійного діагностування. – К.: Наук. думка, 2009. – 264 с.
14. *Скальський В. Р., Андрейків О. С.* Оцінка об'ємної пошкоженості матеріалів методом акустичної емісії. – Львів: Вид. центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2006. – 330 с.
15. *Якушев А. В., Расщепкина Д. В., Баранов А. Н.* Определение предельной длины усталостной трещины в углу буксового проема боковой рамы тележки грузового вагона // Изв. Петербургск. ун-та путей сообщения. – 2017. – № 4. – С. 710–719.
16. *Махненко В. И., Романова И. Ю.* Расчетное прогнозирование долговечности боковой рамы грузового железнодорожного вагона при переменных циклических нагрузках // Автомат. сварка. – 2010. – № 2 (682). – С. 5–9.

Одержано 11.06.2019