

# УРАХУВАННЯМ СТРУКТУРНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ МАТЕРІАЛУ ОСІ КОЛІСНОЇ ПАРИ ПРИ ОЦІНЮВАННІ ЇЇ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ

П.В. Ясній, П.О. Марущак, А.П. Сорочак

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

У статті проаналізовано вплив структурної неоднорідності матеріалу осі на його циклічну тріщиностійкість та запропоновано методику оцінювання залишкового ресурсу осей залізничних колісних пар. На основі запропонованої методики змодельовано підростання поверхневої втомної тріщини в осі з урахуванням зміни співвідношення півосей еліпса та параметрів циклічної тріщиностійкості.

**Ключові слова:** залізнична вісь, залишкова довговічність, циклічна тріщиностійкість, структурна неоднорідність.

**Аналіз підходів до проектування.** В процесі експлуатації конструкційні елементи багатьох машин і механізмів працюють під дією циклічного навантаження, що спричинює ймовірність їх втомного руйнування. Тому для них важливе значення має як оцінка довговічності на етапі проектування, так і визначення залишкового ресурсу в елементах конструкцій з наявними пошкодженнями у вигляді втомних тріщин.

Залізничні осі – вузли, що проектуються для нескінченного терміну служби і від яких значною мірою залежить безпека перевезень залізничним транспортом. Проте, в процесі експлуатації не можна уникнути виникнення пошкоджень через дію корозії, удари баласту залізничного полотна, пошкодження підшипникових вузлів, дефекти виготовлення [1-6]. Загальною є практика зняття з експлуатації осей, в яких методами неруйнівного контролю виявлено дефект або тріщину [7-9].

На даний час в практиці проектування відповідальних високонавантажених елементів конструкцій сформувався кілька концепцій, які по різному розглядають явище втоми матеріалів [1, 10]:

1. Концепція безпечної експлуатації (Safe-life) – компоненти залізничних візків проектуються на нескінченний термін експлуатації, при якому не допускаються жодні ефекти втоми.

2. Відмово стійка концепція (Fail-safe) – допускає можливість локалізованого втомного пошкодження елементів конструкції, але виключає можливість розвитку магістральної втомної тріщини.

3. Концепція допустимого пошкодження (Damage tolerance) – допускає можливість появи магістральної втомної тріщини і ставить за мету запобігання її росту до критичного розміру впродовж терміну експлуатації конструкції. Основним параметром є залишкова довговічність, виражена часом або кількістю циклів навантаження, за які початкова тріщина досягне критичної довжини.

**Методика досліджень.** Для оцінювання залишкового ресурсу осей колісних пар проводили ряд експериментальних досліджень, зокрема вивчали вплив асиметрії циклу навантаження на швидкість росту втомних тріщин на різних ділянках осі колісної пари.

Циклічну тріщиностійкість визначали за однісного розтягу призматичних зразків з центральною тріщиною розмірами 155x25x5 мм (рис. 1). Зразки вирізали із осі колісної пари на ділянці діаметром 198 мм на відстані 20 (ділянка А), 50 (ділянка В) і 81 мм (ділянка С) від її центру.

Дослідження проводили за однісного розтягу з

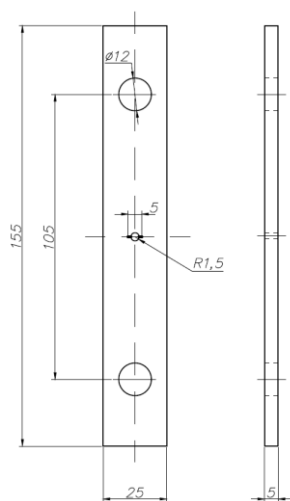


Рис. 1 – Зразок з центральною тріщиною для випробування на циклічну тріщиностійкість

коефіцієнтом асиметрії циклу навантаження  $R = -1$  та  $R = 0$ . Частота навантаження складала  $f = 10$  Гц, форма циклу – синусоїдальна. Дослідження проводили при кімнатній температурі на сервогідралічній випробувальній установці типу STM-100 з комп’ютерною системою керування та реєстрації інформації BISS 2370.

Коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) циклу навантаження  $K$  для плоских зразків з центральною тріщиною визначали за формулою [11]

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \cdot Y, \quad (1)$$

де  $Y$  – поправкова функція [11]:

$$Y = \left[ 1 - 0,025 \left( \frac{a}{W/2} \right)^2 + 0,06 \left( \frac{a}{W/2} \right)^4 \right] \sqrt{\sec \frac{\pi a}{W}}, \quad (2)$$

де  $a$  – половина довжини тріщини;  $W$  – ширина зразка.

Розмах коефіцієнта інтенсивності напружень для різних асиметрій циклу навантаження обчислювали за рекомендацією стандарту ASTM [12]

$$\Delta K = \begin{cases} (1-R)K_{\max}, & R \geq 0 \\ K_{\max}, & R < 0 \end{cases} \quad (3)$$

де  $K_{\max}$  – максимальне значення коефіцієнта інтенсивності напружень в циклі навантажування.

**Вплив структурної неоднорідності матеріалу на швидкість росту втомних тріщин.** Вплив асиметрії циклу навантажування на швидкість росту втомної тріщини в сталі ОСЛ осі колісної пари досліджували в праці [13]. Отримані параметри циклічної тріщиностійкості для різних шарів матеріалу наведено в табл. 1. Отримані експериментальні залежності  $da/dN - \Delta K$  апроксимували рівнянням Паріса

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (4)$$

де  $m, C$  – параметри, які визначали з експерименту.

При порівнянні діаграм втомного руйнування (ДВР) сталі ОСЛ, що отримані для різних ділянок вирізання при випробуванні за асиметрії циклу навантажування  $R = 0$  (рис. 2, а), встановлено, що найвища швидкість поширення тріщин спостерігається у внутрішньому шарі (А), найнижча – у шарі В. Різниця між ними при невеликих значеннях КІН досить значна, майже в 10 разів. Проте при збільшенні КІН і наближенні до ділянки руйнування швидкості поширення тріщин для всіх досліджених ділянок осі майже однакові.

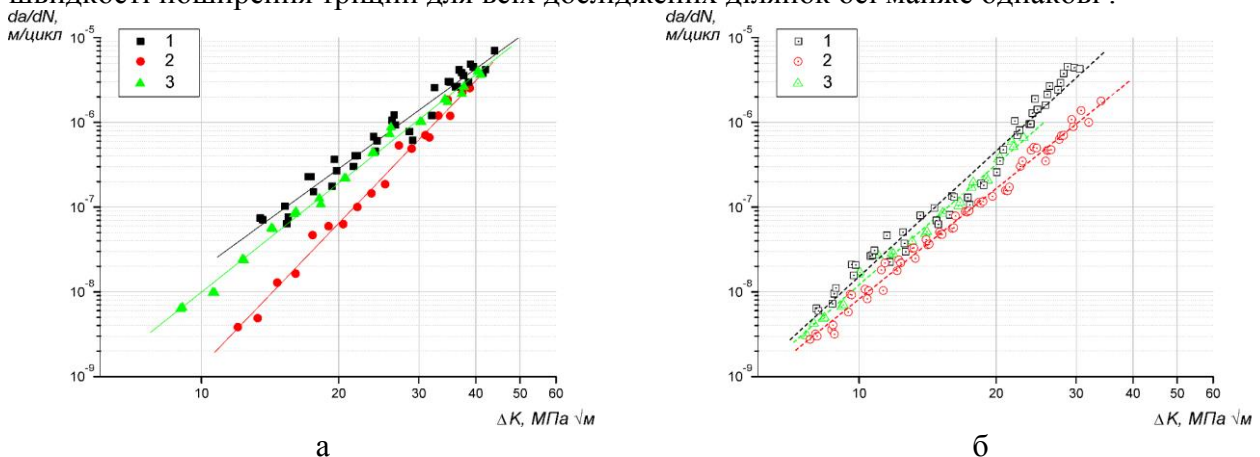


Рис. 2 – ДВР матеріалу осі за асиметрії циклу навантажування  $R = 0$  (а) та  $R = -1$  (б), вирізаного на різних відстанях від її центру: 20 мм (А) – 1; 50 мм (В) – 2; 81 мм (С) – 3

ДВР, отримані за амплітуди навантажування  $R = -1$  (рис. 2, б), схожі до діаграм при  $R = 0$  – найвища швидкість поширення тріщин спостерігається у внутрішньому шарі (А), найнижча – у шарі В. Але в цьому випадку різниця між ними значно менша, всього в 1,5-2 рази при невеликих значеннях КІН. За даної асиметрії циклу навантажування з ростом КІН

спостерігається збільшення різниці між швидкістю поширення тріщини в досліджених зонах вирізання. Так, при КІН  $30 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  вона складатиме близько 3 разів.

Слід зазначити, що для обох розглянутих асиметрій циклу навантажування значення швидкості поширення втомних тріщин для ділянки С знаходяться між значеннями для ділянок А і В. Така значна відмінність в швидкості поширення втомних тріщин на макрорівні пояснюється структурною неоднорідністю матеріалу, раніше встановленою на мезорівні для різних ділянок вирізання зразків [13, 14].

Таблиця 1 – Параметри циклічної тріщиностійкості сталі ОСЛ

R	Ділянка вирізання	$C, \frac{\text{м/цикл}}{(\text{МПа}\sqrt{\text{м}})^m}$	$m$
0	A	$2.26 \cdot 10^{-12}$	3.923
	B	$3.22 \cdot 10^{-15}$	5.615
	C	$5.34 \cdot 10^{-13}$	4.273
-1	A	$1.86 \cdot 10^{-13}$	4.911
	B	$3.87 \cdot 10^{-13}$	4.325
	C	$2.35 \cdot 10^{-13}$	4.710

**Оцінювання залишкового ресурсу.** Моделювали ріст поверхневої півеліптичної втомної тріщини у осі локомотива зі сталі ОСЛ (рис. 3). Методика розрахунку ґрунтується на припущеннях:

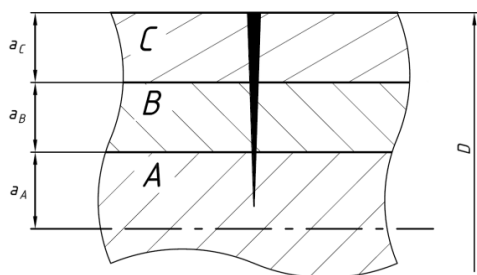


Рис. 3 – Геометричні параметри перерізу з півеліптичною тріщиною

1. Напружений стан осі локомотива з тріщиною описували на основі підходів лінійної механіки руйнування.

2. Вважали що тріщина поширюється лише за розтягуючої фази циклу навантажування.

3. Вісь розглядали за підходами мезомеханіки, як багатомасштабну механічну систему:

- макрорівень (ізотропне середовище);

- мезорівень (тришаровий циліндр);

- структурно-неоднорідне середовище (ферито-перлітна сталь).

Запропоновано модель статичного навантаження буксового вузла залізничного візка, що враховує схему дійсного експлуатаційного прикладення зусилля [6]. Навантаження Р на буксу приймали рівним 260 кН. Модуль Юнга матеріалу (сталі ОСЛ) становив  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,3$ . Поверхнева півеліптична тріщина розташована поблизу букси колісної пари, перпендикулярно до її повздовжньої осі. Залишкову довговічність осі оцінювали за однієї поверхневої півеліптичної тріщини початковою глибиною  $a_0 = 5$  мм. КІН для осі з поверхневою півеліптичною тріщиною визначали за формулою:

$$K = \sigma_{bg} \sqrt{\pi a} \cdot Y \quad (5)$$

де  $a$  – глибина тріщини;  $\sigma_{bg}$  – нормальні напруження в розрахунковому перерізі осі.

Поправкова функція для найглибшої т. А та поверхневої т. С обчислювалися за формулами з [15]:

$$Y_A = 0.854 - 6.027(a/D) + 27.839(a/D)^2 - 44.290(a/D)^3 \quad (6)$$

$$Y_C = 0.642 - 4.865(a/D) + 23.757(a/D)^2 - 33.466(a/D)^3 \quad (7)$$

Для моделювання РВТ використовували параметри циклічної тріщиностійкості  $C$  та  $m$  для різних шарів матеріалу, визначені експериментально (див. табл. 1).

Отримано залежність глибини тріщини від кількості циклів навантаження з врахуванням структурної неоднорідності матеріалу (рис. 4). Порівнюючи результати, одержані за запропонованою методикою з врахуванням структурної неоднорідності матеріалу та в припущенні гомогенного матеріалу, видно, що залишкова довговічність осі для асиметрії навантажування  $R = -1$  на 5% менша значень одержаних в припущенні гомогенного матеріалу

для критичної довжини тріщини  $a_{crit} = 50,8$  мм. Залишкова довговічність осі для асиметрії навантажування  $R = 0$  на 7% нижча за значення, одержані в припущенні гомогенного матеріалу. Порівнюючи результати, одержані за запропованою спрощеною методикою та із урахуванням спектру навантажування, слід зазначити що залишкова довговічність осі для асиметрії навантажування  $R = -1$  у 1,1 разів менша від значень одержаних за блочного спектру. Залишкова довговічність осі, обчислена для асиметрії навантажування  $R = 0$  на 12% вища за значення одержані за блочного навантаження.

Таким чином, хоч дані є близькими, запропонований спосіб обчислення залишкової довговічності дає більш консервативну оцінку залишкового ресурсу осей і може бути запропонований для інженерного використання.

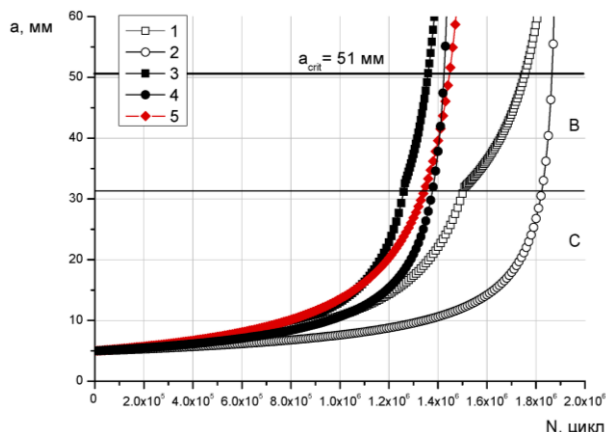


Рис. 4 – Залежність глибини тріщини від кількості циклів навантаження з урахуванням структурної неоднорідності матеріалу (1, 3) та в припущенні гомогенного матеріалу (2, 4, 5 – за даними О.П. Ясній, 2008) при  $R=0$  (1, 2),  $R=-1$  (3, 4) і блочному навантаженні (5)

**Висновки.** В даній роботі виявлено основні закономірності впливу градієнту фізико-механічних властивостей на швидкість росту втомних тріщин в сталі ОСЛ за асиметрії циклу навантажування  $R = 0$  і  $R = -1$  та запропоновано методику оцінювання залишкової довговічності осі колісної пари з напівеліптичним тріщиноподібним дефектом, яка враховує зміну характеристик циклічної тріщиностійкості матеріалу в радіальному напрямі осі. Методика дає можливість визначити параметри довжини тріщини для заданої кількості циклів навантаження і значення довговічності для заданої допустимої глибини тріщини.

#### Перелік посилань

- Zerbst, U. Fracture mechanics in railway applications – an overview [Text] / U. Zerbst, K. Maedler, H. Hintze // Fracture Mechanics. – 2005. – Vol. 72. – P. 163-194.
- Smith, R. A. A brief historical overview of the fatigue of railway axles [Text] / R. A. Smith, S. Hillniansen // Proceedings of Institute of Mechanical Engineering. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2004. – Vol. 218. – P. 267-277.
- Gerdun, V. Failures of bearings and axles in railway freight wagons [Text] / V. Gerdun, T. Sedmak, V. Sinkovec, I. Kovse, B. Cene // Engineering Failure Analysis. – 2007. – Vol. 14. – P. 884-894.
- Hirakawa, R. The analysis and prevention of failure in railway axles [Text] / R. Hirakawa, K. Toyama, M. Kubota // International Journal of Fatigue. – 1998. – Vol. 20. – P. 135-144.
- Gravier, N. Predicting the life of railway vehicle axles [Text] / N. Gravier, J-J. Viet, A. Leluan // Proceedings of the 12th International Wheelset Congress (Quigdao, China, 21-25 September 1998). – Quigdao, 1998. – P. 133-146.
- Причини образования дефектов на поверхности железнодорожных осей [Текст] / Г. В. Левченко [и др.] // Теория и практика металлургии. – 2012. – № 5-6. – С. 97-101.
- Качество поверхности железнодорожных осей [Текст] / Г. В. Левченко [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 1. – С. 48-52.
- Криворучко, В. Н. Система автоматического неразрушающего контроля осей колёсных пар вагонов – оптимальное решение от отечественного производителя [Текст] / В. Н. Криворучко, А. В. Джаганян, А. В. Дидык // Доповіді 9-ої конф. «Неруйнівний контроль», 2007. – С. 37-41.
- Цомук, С. Р. Новые технологии и средства ультразвукового контроля колесных пар вагонов [Текст] / С. Р. Цомук // Вагонный парк. – 2011. – № 8. – С. 46-49.
- Zerbst, U. Parameters affecting the damage tolerance behaviour of railway axles [Text] / U. Zerbst, M. Schödel, H. T. Beier // Engineering Fracture Mechanics. – 2011. – Vol. 78, № 5. – P. 793-809.
- Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений [Текст]. В 2 т. Т. 1 / Под ред. Ю. Мураками; [пер. с англ.] – М. : Мир, 1990. – 448 с.
- ASTM E647-13aе1. Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates [Text] – West Conshohocken : ASTM International, 2013. – 43 p.

13. Sorochak, A. Cyclic fracture toughness of railway axle and mechanisms of its fatigue fracture [Text] / A. Sorochak, P. Maruschak, O. Prentkovskis // Transport and Telecommunication. – Vol. 16, No. 2. – 2015. – P. 158-166.
14. Maruschak, P. Effect of Load Ratio on Fatigue Failure Micromechanisms of Railway Axle Steel [Text] / P. Maruschak, A. Sorochak, S. Panin // Applied Mechanics and Materials. – Vol. 770. – 2015. – P. 209-215.
15. Yasniy, O. Assessment of lifetime of railway axle [Text] / O. Yasniy, Y. Lapusta, Y. Pyndus, A. Sorochak, V. Yasniy // International Journal of Fatigue. – Vol. 50. – 2013. – P. 40-46.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ І СТРУКТУРИ ЕПОКСИКОМПОЗИТИВ МОДИФІКОВАНИХ КАРБОНАТОМ СРІБЛА

А.В. Букетов<sup>1</sup>, П.О. Марущак<sup>2</sup>, О.О. Сапронов<sup>1</sup>,  
Д.О. Зінченко<sup>1</sup>, С.В. Панін<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна

<sup>2</sup>Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль,  
Україна

<sup>3</sup>Інститут фізики міцності і матеріалознавства СВ РАН, Томськ, Росія

The mechanism of influence normal and tangential stresses on the adhesive strength of the epoxy composite filled  $\text{Ag}_2\text{CO}_3$  was described. The optimum filler content to form a coating with maximum values of adhesive strength in the separation and displacement ( $q = 0.500 \text{ wt}\%$ ) was obtained. The mechanism  $\text{Ag}_2\text{CO}_3$  impact on physical and mechanical properties of epoxy composites was generalized. To form the matrix with improved physical and mechanical properties of optimal content of carbonate arhentumu –  $q = 0.500...1.000 \text{ wt}\%$  was found. The fracture surfaces of epoxy composites with different content  $\text{Ag}_2\text{CO}_3$  was examined by optical microscopy.

У процесі експлуатації на деталі машин, механізмів, металоконструкцій технологічного устаткування діють агресивні середовища, знакозмінні температури, динамічні навантаження, що призводить до зменшення ресурсу їх роботи та передчасного виходу із ладу [1, 2]. Для продовження ресурсу їх роботи на сьогодні доцільно використовувати захисні покриття. У цьому плані перспективним є застосування композитів на основі епоксидних зв'язувачів. На сьогодні епоксидні захисні покриття використовують у різних сферах промисловості як країн СНД, так і Європи. Застосування епоксидних захисних покриттів зумовлено широким спектром адгезійних, фізико-механічних, теплофізичних та антикорозійних властивостей [3, 4]. Підвищення експлуатаційних характеристик епоксидних композитів досягають модифікуванням матриці енергетичними полями, органічними та неорганічними хімічними компонентами (модифікаторами, пластифікаторами). Проте, одним із перспективних напрямків поліпшення властивостей композитів є використання наповнювачів [5, 6]. Перспективним у цьому плані є використання як наповнювача карбонату срібла, який містить активні групи ( $-\text{C}-\text{O}-$ ,  $-\text{C}=\text{O}$ ,  $(\text{CO}_3)^{2-}$ ,  $\text{KNO}_3$ ), що здатні взаємодіяти із епоксидним зв'язувачем [7, 8].

**Мета роботи** – дослідити вплив наповнювача карбонату срібла на властивості і структуру епоксидних композитів.

**Матеріали та методика дослідження.** Для формування епоксикомпозитних матеріалів використано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів:  $[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{NH}-]_n$ . Твердник вводили у композицію за вмісту 10 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20.

Як наповнювач використано карбонат срібла  $\text{Ag}_2\text{CO}_3$  (КС) з дисперсністю 0,5 мкм, який характеризується реакційною здатністю до взаємодії з макромолекулами епоксидного олігомеру завдяки значній кількості активних груп.