

УДК 593.375, 669.788

## ЗАЛИШКОВИЙ РЕСУРС ПРУЖНОГО ЕЛЕМЕНТА РЕСОРИ ЗА ВПЛИВУ ВОДНЕВО-МЕХАНІЧНОГО ЧИННИКА

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ<sup>1</sup>, Д. В. РУДАВСЬКИЙ<sup>1</sup>, Р. Я. ЯРЕМА<sup>2</sup>,  
О. С. ДУБИЦЬКИЙ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>2</sup> Львівський локомотиворемонтний завод;

<sup>3</sup> Луцький національний технічний університет

Запропоновано методику розрахунку залишкової довговічності ресорного листа вантажного автомобіля з півеліптичною тріщиною за циклічного навантаження і впливу водневовмісного середовища. В основу методики закладено розрахункову модель поширення втомної тріщини, яка базується на енергетичному критерії механіки руйнування та враховує вплив зовнішнього водневовмісного середовища. Отримано та порівняно між собою результати розрахунків довговічності наводненого і ненаводненого матеріалу ресорного листа.

**Ключові слова:** *втомне руйнування, залишкова довговічність, ресорний лист, півеліптична тріщина, водневовмісне середовище.*

Розвиток промислового виробництва зумовив безперервне збільшення виробництва вантажних автомобілів з ресорними підвісками, для яких зростають вимоги до забезпечення надійності їх функціонування. Зазначимо, що ефективність використання ресор суттєво знижують не тільки динамічні навантаження і коливання, але і шкідливий вплив водню, що потрапляє у метал ресори із зовнішнього середовища.

Робочими корозивними середовищами ресор є вологе повітря та вода. Саме вода, а також водні розчини солей, кислот і лугів створюють сильне електролітичне середовище. Поверхня сталі в електроліті відіграє роль короткозамкнутого багатоелектродного гальванічного елемента, який складається із великої кількості мікроелементів [1, 2]. З іншого боку дуже небезпечними щодо міцності є ультрамікротріщини на поверхні ресор, які стають центрами зародження і розвитку мікротріщин, що мають форму клиноподібних дефектів. Їх виникнення пов'язане із неоднорідностями металічної фази, що сформувалася внаслідок термічної й механічної обробки, плівок окислів та забруднення поверхні металу і рідкої фази. Електролітичні процеси сприяють адсорбції гідратованих іонів водню на катодних поверхнях сталі, де вони звільняються від молекул води. При цьому частина іонів розряджається і, молізуючись, виділяється у вигляді бульбашок газу в електроліт, а частина у вигляді протонів  $H^+$  проникає в кристалічну ґратку сталі. Так проходить низькотемпературне наводнення. Під впливом деформацій формуються додаткові умови, що сприяють протіканню всіх фізико-хімічних процесів, у тому числі й корозійно-дифузійних (пластична деформація сильно активує вплив середовища на метал), а також спостерігають значне зниження опору деформуванню та руйнуванню – адсорбційний ефект зниження міцності (ефект Ребіндера). З досягненням у локальних зонах максимальних розтягувальних напружень у верхній тріщині водень інтенсивно дифундує туди, знижуючи міцність матеріалу [3].

---

Контактна особа: В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, e-mail: skal@ipm.lviv.ua

Незважаючи на те, що ресори вантажних автомобілів підлягають періодичному технічному огляду, втомні тріщини часто виникають у непрогнозований момент часу. Тому виникає необхідність у розроблені ефективних методик оцінки залишкового ресурсу автомобільних ресор за наявності цього найнебезпечнішого, з точки зору втрати міцності і пришвидшення руйнування, дефекту. Однак в літературних джерелах на сьогодні немає завершеної методики побудови кореляційних рівнянь залишкової довговічності автомобільних ресор, в тому числі і з урахуванням шкідливого впливу зовнішнього водневовмісного середовища, що свідчить про недостатній розвиток цього напрямку досліджень. Тому мета роботи – розробити методику і розрахувати залишкову довговічність ресорного листа вантажного автомобіля з поверхневою втомною тріщиною за впливу водневовмісного середовища. Для цього спочатку сформулюємо розрахункову модель поширення втомної макротріщини у наводненому металевому матеріалі.

**Розрахункова модель кінетики поширення втомної макротріщини.** Розглянемо пружно-пластичну наводнену до деякого рівня концентрації  $C_H$  пластину, що ослаблена тріщиною та циклічно навантажується зовнішніми силами  $p$  із асиметрією циклу  $R$  (рис. 1).

Нехай тріщина, поширюючись за механізмом нормального відриву, за  $\Delta N$  циклів навантаження виросла на довжину  $\Delta l$ .

Щоб побудувати кінетичне рівняння росту втомної макротріщини, використаємо енергетичний критерій руйнування на основі I-го закону термодинаміки. Згідно з цим критерієм, отримаємо кінетичне рівняння для визначення швидкості поширення втомної тріщини у металевому матеріалі [4]

$$dl/dN = w_f / [\alpha \cdot \gamma_c^{(H)} - \gamma_s]. \quad (1)$$

Тут  $\gamma_s$  – густина статичної складової енергії розсіювання пластичних деформацій в матеріалі,  $w_f$  – циклічна складова енергії розсіювання пластичних деформацій за один цикл навантаження,  $\gamma_c^{(H)}$  – густина енергії руйнування наводненого матеріалу,  $\alpha$  – коефіцієнт Морроу [5], що пов'язує сумарне розсіювання енергії циклічних деформацій під час руйнування матеріалу із його статичною енергією руйнування.

Під час експлуатації за дії водневих середовищ механічні характеристики металевих елементів, як відомо [6], залежать від ступеня їх наводнювання, тобто від концентрації водню  $C_H$ . Експериментально встановлено, що вплив водню на руйнування металів проявляється зміною їх механічних властивостей [7, 6]. Тоді питому енергію руйнування наводненого матеріалу запишемо так [7]:

$$\gamma_c^{(H)}(C_H) = [K_{Ic}^{(H)}(C_H)]^2 / E, \quad (2)$$

де  $K_{Ic}^{(H)}(C_H)$  – статична тріщиностійкість наводненого металу.

Визначивши енергії деформацій, що входять у рівняння (2) через коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН) для автотрещини [4, 7], отримаємо:

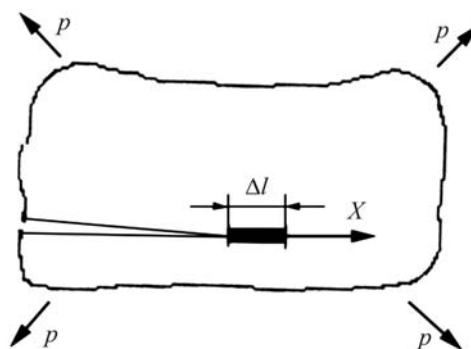


Рис. 1. Схема пластины з тріщиною.

Fig. 1. Scheme of a cracked plate.

$$V = \frac{0,03\sigma_0^{-2}(1-R)^4 K_{I\max}^4}{\alpha \cdot [K_{Ic}^{(H)}(C_H)]^2 - K_{I\max}^2}, \quad (3)$$

де  $V = dl/dN$ ,  $\sigma_0$  – модельне значення границі текучості матеріалу, згідно з  $\delta_c$ -моделлю [3].

Тоді докритичний період росту втомної тріщини  $N_d$  можна визначити за співвідношенням [8]

$$N_d = \int_{l_0}^{l_c} V^{-1}(l) dl, \quad (4)$$

де  $l_0$ ,  $l_c$  – відповідно початкова та критична довжина втомної макротріщини. Отже, рівняння (3), (4) і визначають описану розрахункову модель росту втомної макротріщини у наводненому матеріалі.

Одні із найтипівіших поверхневих дефектів, які виявляють у автомобільних ресорах, досить близькі за формою до півеліптичної тріщини. Тому застосуємо сформульовану вище модель для розрахунку залишкової довговічності ресорного листа із поверхневою півеліптичною тріщиною.

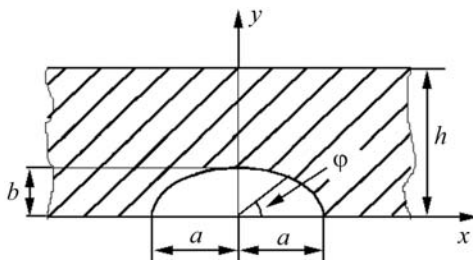


Рис. 2. Схема розташування півеліптичної тріщини.

Fig. 2. Scheme of a semi-elliptical crack position.

**Формулювання задачі.** Розглянемо задачу про ріст втомної півеліптичної тріщини, яка розташована на поверхні ресорного листа товщиною  $h$ , за циклічної зміни зовнішнього розтягувального навантаження із силовим параметром  $p$  (рис. 2) та за дії зовнішнього водневовмісного середовища, що забезпечує на контурі тріщини деяку сталу концентрацію водню  $C_H$ . Нехай  $a_0$ ,  $b_0$  – початкові розміри тріщини. Щоб визначити кінетику росту контуру тріщини в перерізі  $xOy$  (рис. 2), вважали, що контур тріщини під час її поширення завжди залишається

близьким до півеліптичного. Тоді залежність довжини півосей цього контуру від кількості циклів навантаження можна отримати із розв'язку системи двох звичайних диференціальних рівнянь у двох точках цього контуру, що відповідають великій та малій півосі ( $\varphi = 0$ ,  $\varphi = \pi/2$ ) (рис. 2) [8]:

$$\begin{cases} \frac{da}{dN} = V [K_{I\max}(a, b, \varphi = 0), C_H], \\ \frac{db}{dN} = V [K_{I\max}(a, b, \varphi = \pi/2), C_H]; \end{cases} \quad (5)$$

за крайових умов

$$\begin{aligned} N = 0: & a = a_0, b = b_0; \\ N = N_d: & b = h. \end{aligned} \quad (6)$$

Швидкості росту  $V$  півосей контуру тріщини визначали на основі рівняння (3), яке набуде виду

$$V(a, b, C_H) = \frac{0,03\sigma_0^{-2} (1-R)^4 K_{I\max}^4(a, b)}{\alpha \cdot [K_{Ic}^{(H)}(C_H)]^2 - K_{I\max}^2(a, b)}. \quad (7)$$

Вираз для знаходження КІН  $K_I$  для тріщини в цьому випадку запропонований у праці [9]:

$$K_I(a, b, \varphi) = p\sqrt{\pi b/Q}F(\xi, \chi, \varphi), \quad (8)$$

де  $\xi = \frac{b}{h}$ ;  $\chi = \frac{b}{a}$ ;  $F = \frac{M_1 + M_2\xi^3 + M_3\xi^4}{q} f_1 f_2$ ;  $Q = \sqrt{1 + 1,464\chi^{1,65}}$ ;  $q = 0,2 + \chi + 0,6\xi$ ;  $M_1 = 1,13 - 0,09\chi$ ;  $M_2 = -0,54 + \frac{0,89}{0,2 + \chi}$ ;  $M_3 = 0,5 - \frac{0,1}{0,65 + \chi} + 14(1 - \chi)^{24}$ ;  
 $f_1 = (\chi^2 \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi)^{1/4}$ ;  $f_2 = 1 + (0,1 + 0,35\chi^2)(1 - \sin \varphi)^2$ .

**Результати розрахунків.** Систему звичайних нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку (5) з урахуванням (6)–(8) розв’язували числовим методом Рунге–Кутта [10]. Розраховували для наводненого та ненаводненого ресорного листа зі сталі 50ХГ за таких вихідних даних:  $p = 400$  МПа;  $R = 0,5$ ;  $h = 10^{-2}$  м;  $a_0 = 10^{-3}$  м;  $b_0 = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м. Експеримент для визначення зміни механічних характеристик зразка після його наводнення за відповідним режимом провели раніше [2, 11] та отримали:  $\sigma_0 = 540$  МПа;  $\psi = 30,9\%$ ;  $\psi^{(H)} = 36,4\%$ ;  $K_{Ic} = 93,12$  МПа·м<sup>1/2</sup>;  $K_{Ic}^{(H)} = 84,17$  МПа·м<sup>1/2</sup>.

На основі цих результатів за допомогою запропонованої вище методики побудували відповідні діаграми кінетики розвитку втомної тріщини і залишкової довговічності ресорного листа (рис. 3).

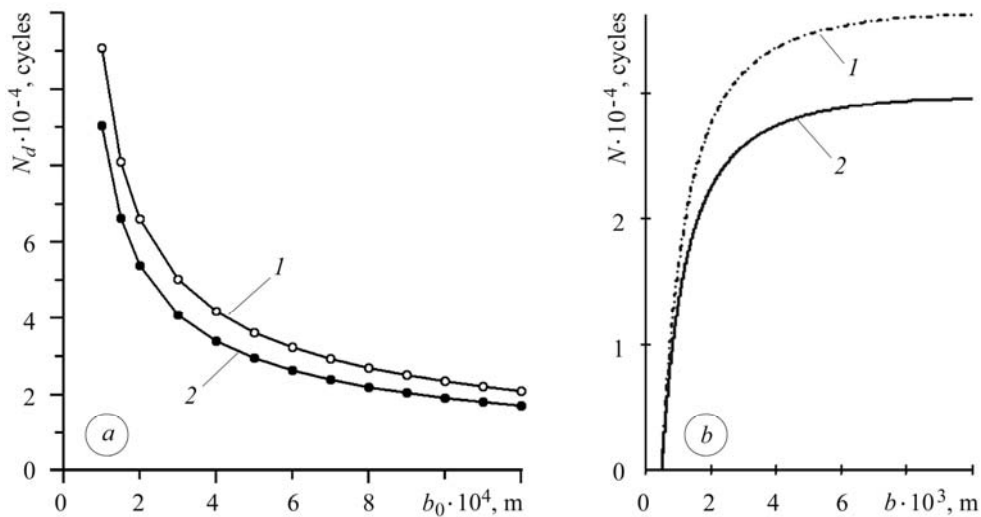


Рис. 3. Результати розрахунків залежності залишкової довговічності (а) ресорного листа зі сталі 50ХГ від початкового розміру півосі  $b_0$  (при  $a_0 = 10^{-3}$  м) поверхневої півеліптичної втомної тріщини та кінетики її поширення (б): 1 – вихідний матеріал; 2 – наводнений.

Fig. 3. Calculation results of the dependence of residual lifetime (a) of 50ХГ steel spring plate on the initial size of the semi-axis  $b_0$  (at  $a_0 = 10^{-3}$  m) of the surface of semi-elliptical fatigue crack and its propagation kinetics (b): 1 – initial material; 2 – hydrogenated.

## ВИСНОВКИ

Залишкова довговічність наводненого листа ресори зі сталі 50ХГ із втомною півеліптичною тріщиною, розташованою посередині його перерізу, є нижча приблизно на 20...25% порівняно з ненаводненою ресорою у діапазоні початкових значень малої півосі тріщини  $b_0$  від 0,1 до 1 mm. Розрахунок (рис. 3а) показав, що співвідношення півосей тріщини під час її поширення наближається до  $b/a = 1$  від вибраного значення  $b_0/a_0 = 1/2$  у початковий момент часу.

**РЕЗЮМЕ.** Предложена методика расчета остаточной долговечности рессорного листа грузового автомобиля с полуэллиптической трещиной при циклическом нагружении и влиянии водородсодержащей среды. В основу методики заложено расчетную модель распространения усталостной трещины, построенную на основании энергетического критерия механики разрушения с учетом влияния внешней водородсодержащей среды. Проведено сравнение полученных результатов расчета долговечности наводороженного материала рессорного листа с ненаводороженным.

**SUMMARY.** The method of lifetime estimation of lorry spring plate with a semi-elliptical crack under action of cyclic loading and hydrogenous environment is proposed. The method is based on fatigue crack growth calculation model using the fracture mechanics energetic criterion. Hydrogen environment effect on spring plate lifetime was taken into account. Lifetime calculation results obtained for the hydrogenated and non-hydrogenated material were compared.

1. Карпенко Г. В. Прочность стали в коррозионной среде. – М.; К.: Машгиз, 1963. – 188 с.
2. Скальський В. Р. Акустично-емісійне дослідження чутливості до водневої деградації ресорної сталі // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1999. – **35**, № 4. – С. 113–119.  
(Skal's'kyi V. R. Acoustic-emission investigation of the sensitivity of spring steel to hydrogen degradation // Materials Science. – 1999. – **35**, № 4. – P. 572–580.)
3. Панасюк В. В. Механіка квазіхрупкого руйнування матеріалів. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.
4. Андрейків О. Є., Рудавський Д. В., Гембара О. В. Розрахункова модель поширення втомних тріщин у наводнених зварних з'єднаннях // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – **38**, № 6. – С. 18–24.  
(Andreikiv O. E., Rudavs'kyi D. V., and Gembara O. V. Computational model of propagation of fatigue cracks in hydrogenated welded joints // Materials Science. – 2002. – **38**, № 6. – P. 780–788.)
5. Morrow J. Investigation of plastic strain energy as a criterion for finite fatigue life // The garret corporation report. – Phaeniz Ariz, 1950. – P. 105–108.
6. Колачев Б. А. Водородная хрупкость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 217 с.
7. Механіка руйнування і прочність матеріалів: Справ. пос. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1988. – Т. 1. – 488 с.
8. Андрейків А. Е., Дарчук А. И. Усталостное разрушение и долговечность конструкций. – К.: Наук. думка, 1992. – 183 с.
9. Механіка руйнування і прочність матеріалів: Справ. пос. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. Т. 2: Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами / М. П. Саврук. – К.: Наук. думка, 1988. – 620 с.
10. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. – М.: Бинум, 2001. – С. 363–375.
11. Скальський В. Р., Андрейків О. Є. Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії. – Львів: Вид-во ЛНУ ім. Івана Франка, 2006. – 330 с.

Одержано 16.11.2012