

## ОЦІНЮВАННЯ ПЕРІОДУ ЗАРОДЖЕННЯ ВТОМНОЇ МІКРОТРИЩИНИ НА ДОРІЖЦІ КОЧЕННЯ КІЛЬЦЯ БУКСОВОГО ПІДШИПНИКА

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ<sup>1</sup>, Д. В. РУДАВСЬКИЙ<sup>1</sup>, Я. Р. ЯРЕМА<sup>2</sup>, В. Р. БАС<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> ПрАТ "Львівський локомотиворемонтний завод"

Запропоновано розрахункову методику оцінювання періоду зародження втомної мікротріщини біля вершини поверхневого раковиноподібного дефекту на доріжці кочення буксового підшипника локомотива. В основі цієї методики закладено модель, що базується на енергетичному підході механіки руйнування матеріалів. Для визначення необхідних механічних констант матеріалу підшипника виконано експериментальні дослідження, а саме: статичні та втомні випробування зразків сталі ШХ15 кільця буксового підшипника. Показано, що за розташування у найнавантаженишому місці доріжки кочення раковиноподібного поверхневого дефекту біля його гладкої вершини може зародитися втомна мікротріщина за порівняно короткий період роботи підшипника у експлуатаційному режимі.

**Ключові слова:** буксовий підшипник, втомна тріщина, поверхневі дефекти, залишкова довговічність, пластична деформація, контактні напруження.

Значне механічне навантаження на доріжках кочення буксового підшипника локомотива нерідко призводить до зародження поверхневих гострокінцевих дефектів [1, 2]. Такі тріщиноподібні дефекти часто можуть виникати за наявності різного типу мікрораковин на пошкоджених ділянках доріжок. Зокрема, як показує практика, причиною утворення мікрораковин можуть бути так звані електроопіки внаслідок проходження окремих розрядів електричного струму протягом короткого часу (кратери, рис. 1а) або тривалої дії електричного струму із певною частотою (рифлення, рис. 1б). Також такі мікрораковини можуть з'являтися і через втискання твердих частинок відшарованого металу в результаті утворення контактно-втомних пошкоджень чи попадання в мастило підшипника сторонніх твердих тіл (т. зв. ум'ятини) (рис. 1с).

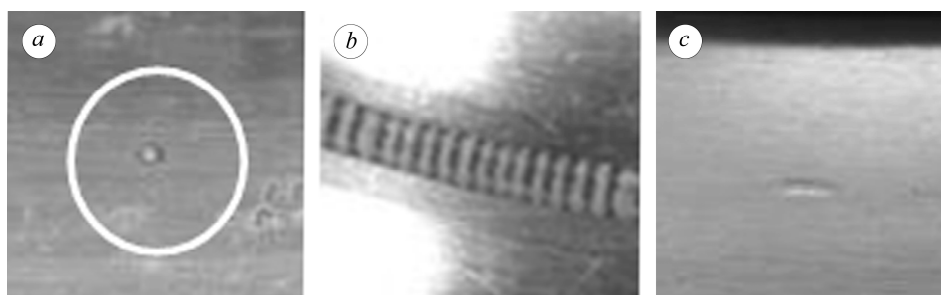


Рис. 1. Доріжки кілець буксових підшипників із поверхневими дефектами.

Fig. 1. Photos of axle bearing races with surface defects.

Висока концентрація та циклічна зміна внаслідок обертання підшипника механічних напружень у цих дефектах є причиною зародження та розвитку втомних тріщин. Тривалість періоду  $N_i$  зародження втомної тріщини нерідко може становити значну частину залишкової довговічності буксового підшипника локомотива. Тому оцінювання періоду зародження втомної тріщини є ключовим для визначення залишкового ресурсу підшипника в цілому. Нижче запропоновано розрахункову методику оцінювання періоду зародження втомної тріщини біля вершини поверхневої мікрораковини.

**Формулювання задачі.** Розглянуто задачу про зародження втомної тріщини біля мікроконцентратора напружень на доріжці кочення зовнішнього кільця буксового підшипника.

Відзначимо, що існують різні типи підвіски корпусів локомотивів до колісної пари через буксу [1–3], які спричиняють різний напружено-деформований стан у кільцях буксового підшипника. Розглянемо найнебезпечніший з точки зору руйнування підшипника випадок, коли майже все навантаження тиску ваги локомотива на буксу припадає на верхній ролик (рис. 2).

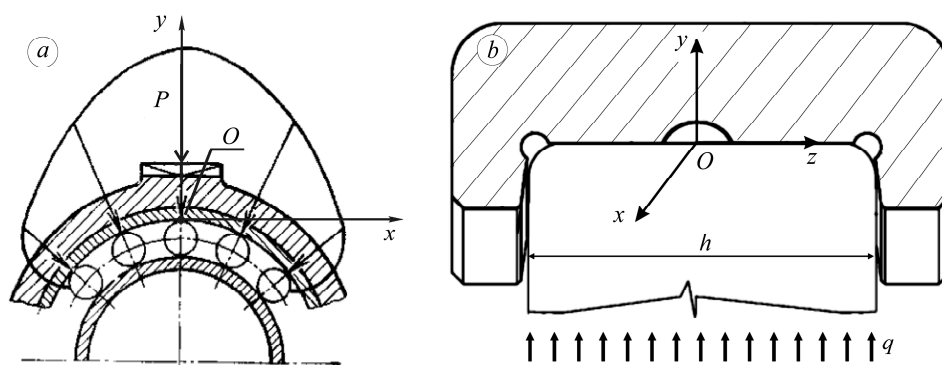


Рис. 2. Схема навантаження буксового підшипника (а) та поперечний переріз його зовнішнього кільця із мікрораковиною (b).

Fig. 2. Loading scheme of axle bearing (a) and cross section of the bearing external racer with microcavity (b).

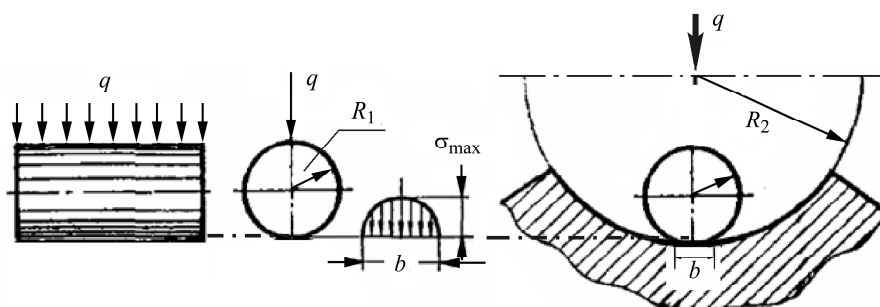


Рис. 3. Схеми контакту циліндричних тіл на кільці буксового підшипника.

Fig. 3. Scheme of cylindrical bodies contact at the axle bearing racer.

Тоді під час роботи підшипника у найвищій точці  $O$  (рис. 2а) виникатимуть контактні напруження  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  та  $\sigma_{zz}$  (рис. 2b). Вирази для них отримано із розв'язку відповідних контактних задач механіки для циліндричних деформівних тіл [4, 5] (рис. 3). Зокрема, показано [4], що для ширини  $b$  прямокутної ділянки контакту циліндричних тіл справедлива формула

$$b = 3,04 \cdot \sqrt{E^{-1} q R_2 R_1 / (R_2 + R_1)},$$

де  $E$  – модуль пружності; а для максимального значення стискальних напружень  $\sigma_{\max}$  на цій ділянці контакту

$$\sigma_{\max} = 0,418 \cdot \sqrt{q E R_2^{-1} R_1^{-1} (R_2 - R_1)}.$$

Припустимо, що у цьому найнавантаженому місці присутній дефект у вигляді мікрораковини. Під час роботи підшипника вона заповнюється мастильною рідиною. Через це у момент контакту мікрораковини з роликком в її порожнині виникає гідравлічний тиск, що, своєю чергою, створює високу концентрацію циклічно змінних (пульсуючих) розтягальних напружень в околі контуру вершини раковини. Задача полягає у визначенні періоду зародження втомної тріщини біля такого мікроконцентратора напружень. Для її вирішення спочатку сформулюємо таку розрахункову модель.

**Розрахункова модель зародження втомної тріщини вздовж контуру мікроконцентратора напружень.** Розглянемо пружно-пластичний півпростір, що містить на поверхні мікроконцентратор напружень у вигляді сплюсненої мікрораковини радіуса  $r_0$ , а  $\rho$  – радіус заокруглення у її вершині (рис. 4).

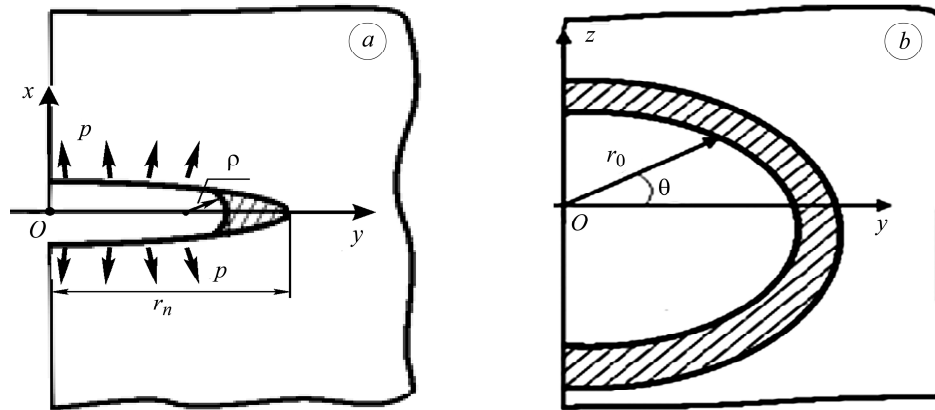


Рис. 4. Схема перерізу безмежного тіла зі сплюсненою мікропорожниною координатними площинами  $xOy$  (а) та  $zOy$  (б).

Fig. 4. Cross-section by coordinate planes  $xOy$  (a) and  $zOy$  (b) of an infinity body with flattened microcavity.

Вздовж контуру мікроконцентратора напружень під дією прикладеного на поверхнях порожнини циклічно-змінного (пульсуючого) гідравлічного тиску  $p$  виникає початкова зона передруйнування глибиною  $r_p - r_0$  (рис. 4). Нехай після  $N_i$  циклів навантаження по контуру мікроконцентратора напружень стрибкоподібно з'являється елементарна півкільцева мікротріщина. Як свідчать експериментальні результати [6], під час циклічного деформування елементарного об'єму матеріалу вздовж контуру концентратора напружень внаслідок нагромадження дефектів мікроструктури (мікропластичних деформацій, утворення мікропустот, сіток різноорієнтованих мікротріщин тощо) з'являється елементарна мікротріщина, вже переорієнтована в площину нормального відриву довжиною  $r_p - r_0$ , що приблизно збігається із віддаллю від вершини концентратора до точки дії максимального розтягального напруження.

В основу моделі закладено енергетичний критерій механіки руйнування, згідно з яким, в довільному елементарному мікрооб'ємі матеріалу відбудеться

руйнування, якщо сумарна незворотно розсіяна в ньому енергія пластичних деформацій  $W$  за всі цикли навантаження досягне критичного значення [7, 8]

$$W = \alpha \cdot W_c, \quad (1)$$

де  $W_c$  – енергія руйнування матеріалу за його однократного статичного навантаження,  $\alpha$  – коефіцієнт Морроу [7].

Величина повного незворотнього розсіювання енергії пластичних деформацій  $W$  матиме дві складові: статичну  $W_s$ , що дорівнює розсіяній енергії пластичних деформацій за початкового (однократного) навантаження до максимального рівня  $p_{\max}$  (рис. 5a), та циклічну  $W_f$ , що дорівнює сумарній за всі цикли навантаження дисипації енергії пластичних деформацій у циклічній (реверсивній) пластичній зоні [8]. Тоді рівняння (1) можна записати так:

$$W_s + W_f = \alpha \cdot W_c. \quad (2)$$

Припускаємо, що зона пластичної деформації має достатньо сплюснуту форму, щоб вважати її плоскою із площею  $S_0$ . З огляду на доволі малу її площу, статичну складову розсіювання енергії  $W_s$  та енергію руйнування матеріалу  $W_c$  можна записати через їх густини (приймаючи ці густини сталими в межах площі  $S_0$ ) у вигляді

$$W_s = \gamma_s S_0; \quad W_c = \gamma_c S_0, \quad (3)$$

де  $\gamma_s$  – густина статичної складової розсіювання енергії пластичних деформацій,  $\gamma_c$  – густина енергії руйнування матеріалу.

Тоді на основі (2), (3) енергетичний критерій (1) набуде вигляду

$$\gamma_s S_0 + N_i (w_f - w_{th}) = \alpha \cdot \gamma_c S_0 \quad (w_f > w_{th}), \quad (4)$$

де  $w_f$  – циклічна складова величини розсіювання енергії пластичних деформацій за цикл навантаження, а  $w_{th}$  – її порогове значення.

Густину енергії руйнування матеріалу визначаємо як площу під повною діаграмою розтягу циліндричного зразка матеріалу [8]. Діаграму циклічного розтягу елемента об'єму зони передруйнування наближено моделюємо діаграмою для ідеально пружно-пластичного матеріалу (рис. 5b).

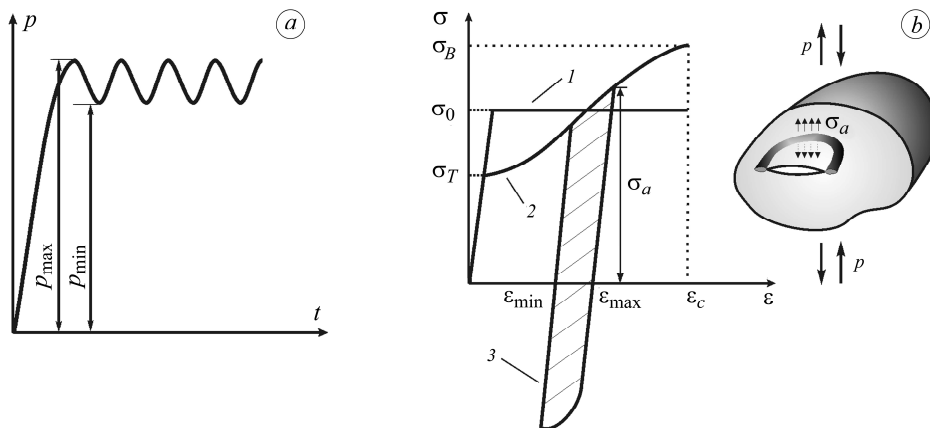


Рис. 5. Схематична залежність циклічного навантаження  $p$  від часу  $t$  (a) та модельне подання (1) діаграми циклічного розтягу (2) елемента об'єму зони передруйнування із симетричною петлею гістерезису (3) (b) [8, 9].

Fig. 5. Dependence of cyclic loading  $p$  on time  $t$  (a) and modeling (1) of cyclic tension diagram (2) of a volume element in prefracture zone with symmetric hysteresis loop (3) (b) [8, 9] (schematically).

Таким чином, отримаємо:

$$\gamma_c = \sigma_0 \epsilon_c,$$

де  $\sigma_0$  – модельне значення границі текучості матеріалу;  $\epsilon_c$  – деформація руйнування матеріалу.

Згідно з працею [9], для розмаху деформації  $\Delta\epsilon = (\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min})$  у зоні передруйнування можна записати наближену формулу

$$\Delta\epsilon \approx 0,5(1-R)^2 \epsilon_{\max},$$

де  $R = p_{\min}/p_{\max}$  – асиметрія циклу навантаження. Тут  $p_{\max} = 0$ , тому маємо

$$\Delta\epsilon \approx 0,5\epsilon_{\max}.$$

Тоді циклічну складову незворотно розсіяної енергії пластичних деформацій можна наближено визначити як площу петлі гістерезису (рис. 5, крива 3) за формулою

$$w_f = \sigma_0 \Delta\epsilon S_0,$$

а її порогове значення так:

$$w_{th} = \sigma_0 \Delta\epsilon_{th} S_0,$$

де  $\Delta\epsilon_{th}$  – пороговий розмах деформації (константа матеріалу).

Густину статичної складової дисипації енергії пластичних деформацій запишемо так:

$$\gamma_s = \sigma_{\max} \epsilon_{\max}.$$

Показано [10], що із достатньою точністю деформацію у вершині гладкого концентратора напружень можна визначити із наближеного співвідношення

$$\epsilon_{\max} = \left(1 + (\rho/\rho_0)^2\right)^{-1/2} \left(K_{I\max}^{(\rho)}/K_c\right)^2 \epsilon_c, \quad (5)$$

де  $K_{I\max}^{(\rho)}$  – максимальне значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) у вершині тріщини, в яку переходить мікроконцентратор (сплюснута мікрораковина) при  $\rho \rightarrow 0$  (див. рис. 4);  $\rho_0 = 4K_c^2/(\pi E \sigma_T \epsilon_c)$  – константа матеріалу;  $K_c$  – статична тріщиностійкість;  $\sigma_T$  – границя текучості.

Визначивши таким чином енергії, що входять в енергетичний критерій (4), отримаємо для періоду зародження втомної мікротріщини біля контуру концентратора напружень у металевому матеріалі співвідношення

$$N_i = (\alpha \cdot \epsilon_c - \epsilon_{\max})(\epsilon_{\max} - 2\Delta\epsilon_{th})^{-1}. \quad (6)$$

**Експериментальні випробування.** Всі константи матеріалу, які входять у співвідношення (5), (6), крім коефіцієнта Морроу  $\alpha$  та порогової деформації  $\Delta\epsilon_{th}$ , можуть бути визначені із експерименту на статичний розтяг циліндричного зразка. Коефіцієнт  $\alpha$ , який дозволяє визначати сумарне розсіювання енергії циклічних пластичних деформацій під час руйнування матеріалу через його статичну енергію руйнування, та константу  $\Delta\epsilon_{th}$  знаходять із експерименту на циклічну втому. Тому для визначення усіх цих невідомих констант виконано відповідні експериментальні дослідження, а саме: статичні та втомні випробування зразків сталі ШХ15 кільця підшипника для побудови її діаграми розтягу та визначення періоду зародження втомної тріщини.

В експериментах на циклічну втому застосовано установку для дослідження зародження та розвитку втомних тріщин у балкових зразках прямокутного чи

квадратного поперечного перерізу (рис. 6). Випробовували на зразках із заокругленими надрізами (рис. 6а). За конструкційним принципом дії установка нагадує силову схему машин типу Шенк–Ерлінгер [11, 12]. Вона може працювати за схемою консольного чи чистого згинів. Основні технічні характеристики установки: максимальне зусилля на важелі – 3,0 kN; тип зразка – балковий; частота навантаження – 0,1...100 Hz; габарити – 680×445×490 mm; вага – 560 N.

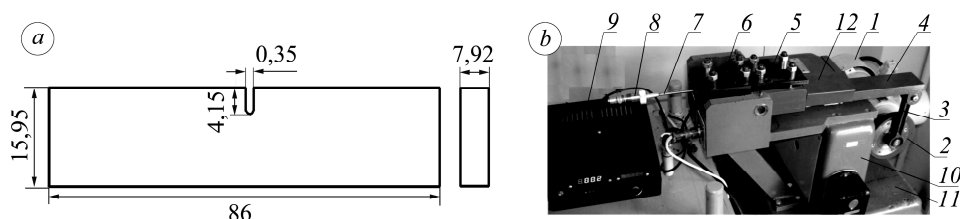


Рис. 6. Схематичне зображення зразка для випробувань (а) та загальний вигляд установки (б): 1 – електродвигун; 2 – ексцентрик; 3 – шатун; 4 – важіль; 5 – рухомий захоп; 6 – нерухомий захоп; 7 – хвилевід сигналів акустичної емісії; 8 – первинний перетворювач акустичної емісії; 9 – вимірювальний модуль; 10 – стійка; 11 – станина; 12 – кожух тензометричного вимірювального мосту.

Fig. 6. Scheme of the test specimen (a) and test machine (b): 1 – electromotor; 2 – eccentric; 3 – coupler; 4 – lever; 5 – movable clamp; 6 – stationary clamp; 7 – acoustic emission signals waveguide; 8 – primary transducer of acoustic emission; 9 – measurement module; 10 – upright frame; 11 – base; 12 – cover of tensometric measuring bridge.

На основі отриманих експериментальних результатів та розрахункових співвідношень (5), (6) за допомогою методу найменших квадратів визначені значення механічних характеристик досліджуваного матеріалу:  $\alpha = 5$ ;  $\Delta\epsilon_{th} = 2,318 \cdot 10^{-3}$ . Статичні механічні характеристики знайдені із побудованої діаграми розтягу циліндричного зразка матеріалу:  $\sigma_T = 1050$  МПа;  $\epsilon_c = 0,6$ ;  $K_c = 21,3$  МПа.

**Результати розрахунків.** Для спрощення розрахунків вважатимемо, що форма мікрораковини є близькою до сплюсненого півсфероїда радіусом  $r_0$  із деяким сталим та достатньо малим радіусом заокруглення вздовж контуру його вершини  $\rho$  (див. рис. 4), а тріщина зароджується біля такого мікроконцентратора напружень одним стрибком та набуває форму півдискової. Для застосування формул (5), (6) до оцінювання періоду зародження втомної тріщини півдискової форми необхідно спочатку визначити КІН  $K_{I\max}^{(p)}$ . Для цього скористаємося результатами розв’язку задачі про КІН для півдискової поверхневої тріщини у півпросторі (площина тріщини перпендикулярна до поверхні півпростору) в умовах герцівського контакту кочення [13] та заповненої рідиною, що створює сталий тиск на її береги (рис. 7а).

Показано [13] розв’язок такої задачі

$$K_{I\max} = \sigma_{\max} \sqrt{\pi \cdot r_0} \cdot F_1,$$

де  $F_1$  – деяка безрозмірна поправкова функція. Отримані табличні дані [13] функції  $F_1$  апроксимували із високою точністю параболічною залежністю у діапазоні  $r_0/b = 0,1 \dots 1,0$  (рис. 7б)

$$F_1(r_0/b) = -0,298(r_0/b)^2 + 0,757(r_0/b) + 0,014.$$

Таким чином, на основі залежності (6) розраховано період зародження втомної мікротріщини біля вершини півсферичної сплюсненої мікрораковини за таких вихідних даних: радіус ролика  $R_1 = 0,017$  m; радіус зовнішнього кільця підшипника  $R_2 = 0,142$  m; кількість роликів у підшипнику  $n = 18$ ; тиск колісної пари ло-

комотива на рейки  $P = 245 \text{ kN}$ ; діаметр колеса  $D_w = 1,25 \text{ m}$ ; розміри мікрораковини  $r_0 = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ,  $\rho = 0,125 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ; матеріал підшипника – сталь ШХ15.

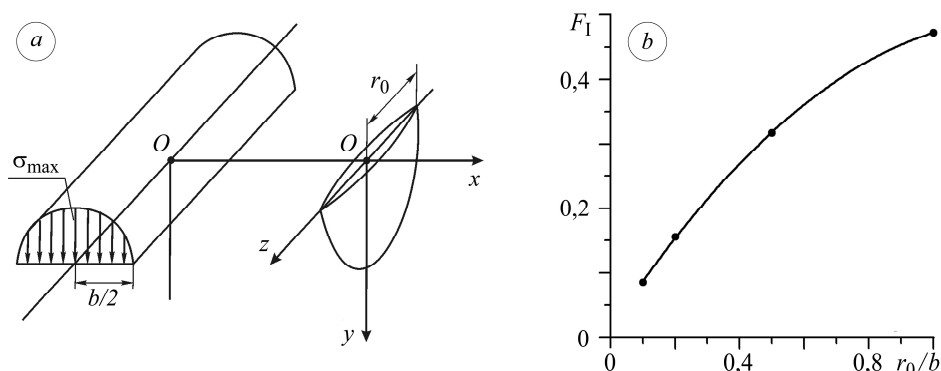


Рис. 7. Схема півпростору із півдисковою тріщиною в зоні контакту (а) та графічна залежність безрозмірної поправки  $F_1$  від  $r_0/b$  (b) (кружечки – табличні дані, суцільна лінія – апроксимація).

Fig. 7. Half-space with a semi-circular crack at the contact zone (a) and graphical dependence of dimensionless correction function  $F_1$  on  $r_0/b$  (b) (points – table data, solid line – approximation).

Розрахований період зародження мікротріщини у зоні передруйнування доріжки кільця становив  $N_i = 2,1 \cdot 10^6$  циклів навантаження–розвантаження. Його перерахували на довжину пробігу  $L_m$  локомотива через кількість роликів у підшипнику  $n$  та радіус колеса  $D_w$  за формулою

$$L_m = 10^{-3} \frac{\pi D_w}{n \cdot n_c} N_i,$$

де  $n_c$  – кутова швидкість обертання сепаратора буксового підшипника. Величину  $n_c$  можна визначити із відомого співвідношення кінематики підшипників [4]

$$n_c = 0,5 \cdot n_1 (1 - R_1/d_w),$$

де  $n_1$  – кутова швидкість обертання внутрішнього кільця підшипника,  $d_w$  – діаметр обертання центра ролика. Розрахований таким чином пробіг локомотива до зародження гострокінцевого дефекту біля вершини мікрораковини становив  $\approx 1,3 \cdot 10^3 \text{ km}$ .

## ВИСНОВКИ

Розрахунки показали, що порівняно невеликі за розмірами раковини на доріжках кочення буксового підшипника за достатньо короткий період часу можуть перетворитися у гострокінцеві тріщиноподібні дефекти. Такі дефекти можуть продовжити розвиватись, перейшовши у стадію росту магістральної втомної тріщини, та призвести до повного руйнування підшипника.

Зазначимо, що розглянуто випадок розташування мікрораковини у найнавантажнішому місці, де період зародження мікротріщини мінімальний. Також у розрахунках не враховано ефект проковзування роликів уздовж доріжки кочення під час експлуатації підшипника, що вплинуло на розрахунок у бік заниження періоду зародження втомної мікротріщини.

**РЕЗЮМЕ.** Предложена расчетная методика оценивания периода зарождения усталостной микротрещины возле вершины поверхностного раковиноподобного дефекта на дорожке качения буксового подшипника локомотива. В основе этой методики заложено модель, которая базируется на энергетическом подходе механики разрушения материалов. Для определения необходимых механических констант материала подшипника про-

ведены экспериментальные исследования, а именно: статические и усталостные испытания образцов стали ШХ15 кольца буксового подшипника. Показано, что в случае нахождения в наиболее нагруженном месте дорожки качения раковиноподобного поверхностного дефекта возле его гладкой вершины может зародиться усталостная микротрещина при сравнительно коротком периоде работы подшипника в эксплуатационном режиме.

*SAMMARY.* The calculation method of the initiation period estimation of fatigue microcrack at the tip of surface cavity at axle bearing race is proposed. The method uses the calculation model based on fracture mechanics energetic approach. To find the required static and fatigue mechanical characteristics of the axle bearing material the specimens of ШХ15 steel were tested. It was shown that in the case of the least favourable location of the defect the fatigue microcrack was initiated at the smooth defect tip within comparatively short exploitation period.

1. *Электровоз ВЛ11.* Руководство по эксплуатации / Под ред. Г. И. Чиракадзе и О. А. Кикнадзе. – М.: Транспорт, 1983. – 464 с.
2. *Электровозы ВЛ10 и ВЛ10<sup>У</sup>.* Руководство по эксплуатации / Под ред. О. А. Кикнадзе. – М.: Транспорт, 1981. – 518 с.
3. *Механическая часть тягового подвижного состава:* Уч. для ВУЗов ж.-д. трансп. / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак и др. – М.: Транспорт, 1992. – 440 с.
4. *Иосилевич Г. Б.* Детали машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
5. *Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В.* Справочник по сопротивлению материалов. – К.: Наук. думка, 1988. – 736 с.
6. *Ярема С. Я., Попович В. В.* Влияние структуры и концентрации напряжений на период зарождения усталостной трещины в стали 65Г // Физ.-хим. механика материалов. – 1985. – № 2. – С. 35–40.  
(*Yarema S. Ya., Popovich V. V.* Influence of the structure and stress concentration on the period of fatigue crack origin in 65G steel // Materials Science. – 1985. – № 2. – P. 133–138.)
7. *Morrow J.* Investigation of plastic strain energy as a criterion for finite fatigue life // The garret corporation report. – Phaeniz Ariz, 1950. – P. 105–108.
8. *Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов* / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин и др. // Механика разрушения и прочность материалов / Под общей ред. В. В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1990. – Т. 4. – 680 с.
9. *Analysis of short and long fatigue cracks growth kinetics under non-regular loading* / V. V. Panasyuk, O. Ye. Andreykiv, O. I. Darchuk, P. S. Kun // Structural integrity: experiments, models, applications. – Proc. 10 Europ. Conf. on Fracture (ECF-10) / Eds. K. H. Schwalbe, C. Berger. – EMAS, 1994. – 2. – P. 1271–1276.
10. *Панасюк В. В.* Механика квазихрупкого разрушения материалов. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.
11. *Серенсен С. В., Гарф М. Е., Козлов Л. А.* Машини для испытаний на усталость. – М.: Машгиз, 1957. – 404 с.
12. *Оцінка розвитку втомного руйнування в'язких конструкційних сталей* / В. Р. Скальський, Д. В. Рудавський, П. Я. Галан та ін. // Вісник Дніпропетровського нац. ун.-ту залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 33. – С. 251–254.
13. *Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2-х т.* / Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – Т. 1. – 448 с.

Одержано 03.01.2014