

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

УДК 539.375:625.143

О. П. ДАЦИШИН¹, Г. П. МАРЧЕНКО^{2*}, А. Ю. ГЛАЗОВ³

¹Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, Львів, Україна, 79601, тел./факс +38 (032) 263 73 34, ел. пошта datsyshy@ipm.lviv.ua, ORCID 0000-0003-0364-148X

^{2*}Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, Львів, Україна, 79601, тел./факс +38 (032) 263 73 34, ел. пошта mhp@ipm.lviv.ua, ORCID 0000-0003-0767-4561

³Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, Львів, Україна, 79601, тел./факс +38 (032) 263 73 34, ел. пошта glazov@ipm.lviv.ua, ORCID 0000-0002-7664-4879

ПРО ПОВЕРХНЕВЕ РУЙНУВАННЯ ГОЛОВОК ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК

Мета. Утворення тріщиноподібних дефектів у рейках залізничної колії є серйозною проблемою для інженерної практики через небезпеку створення аварійних ситуацій. Метою цієї роботи є теоретичне встановлення характеристичного кута поширення поверхневих тріщин у головках залізничних рейок, який є головним фактором у формуванні типових поверхневих контактних пошкоджень, таких як «пітинг», «риси», «нора» тощо. Необхідно також знайти умови для визначення цього кута. **Методика.** Дослідження проводили на основі методу сингулярних інтегральних рівнянь. Пошкоджену поверхневою тріщиною рейку моделювали як півплощину з крайовим розрізом, а дію колеса на рейку – як односпрямоване повторне поступальне переміщення уздовж краю півплощини з герцівськими контактними зусиллями, з дотичною складовою. Задачу визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень близько вершини тріщини в головці рейки звели до системи двох дійсних сингулярних інтегральних рівнянь, які розв'язали чисельно – методом механічних квадратів Гауса-Чебишова. Складність задачі полягає в тому, що межі ділянок контакту і розкриття берегів тріщини наперед невідомі та змінюються під час переміщення контактних зусиль. Ці межі визначали одночасно з розв'язанням інтегральних рівнянь задачі за додатковими умовами методом ітерацій. **Результати.** Теоретично встановлена наявність у головці рейки характеристичного кута поширення поверхневих тріщин за механізмом поперечного зсуву та записані умови для його визначення. Отримані результати добре узгоджуються з інженерними та експериментальними даними. **Наукова новизна.** Вперше теоретично знайдено величини характеристичного кута, під яким на початковій стадії поширюються зсувні поверхневі контактні тріщини в головці залізничної рейки від дії коліс. Також записано умови для визначення цього кута. **Практична значимість.** Отримані дані мають важливе значення для інженерної практики, оскільки виявляють природу поверхневих контактних дефектів рейок за різних умов експлуатації залізничної колії та дозволяють прогнозувати їх контактну міцність і довговічність.

Ключові слова: залізнична рейка; герцівське навантаження; тертя; зсувна тріщина; коефіцієнти інтенсивності напружень; характеристичний кут

Вступ

Під час експлуатації технічної пари «колесо-рейка» поверхні кочення залізничних рейок часто пошкоджуються тріщиноподібними дефектами (рис. 1). При цьому, як показує інженерна практика, на початковій стадії свого розвитку поверхневі макротріщини у головці рейки здебільш поширюються під кутом 10° – 40°

[5, 11, 13, 16] у напрямку переміщення рухомого складу. А при формуванні дефекту типу «нора» (див. рис. 1, б), крім лівої магістральної вітки, під малим кутом до поверхні кочення і з того ж самого місця додатково розвивається ще і його права вітка. Тому для оцінювання контактної міцності та довговічності пошкодженої рейки важливо визначити її напружено-деформований стан або ж коефіцієнти інтенсив-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

вності напружень (КІН) у вершинах тріщин – місцях виникнення найбільшої концентрації напружень і одночасно місцях подальшого руйнування матеріалу.

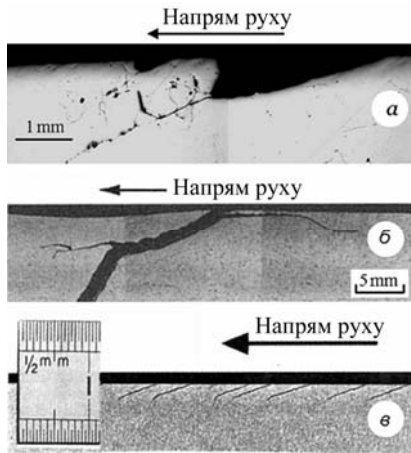


Рис. 1. Типові контактні-втомні поверхневі пошкодження в головці рейки:

a – пітинг [15],
b – «нора» [12], *c* – «риски» [10]

Fig. 1. Typical contact-fatigue surface damage in the rail head:

a – pitting [15],
b – «squat» [12], *c* – «checks» [10]

Актуальність роботи полягає в тому, що на сьогодні на Українських залізницях до 50 % випадків причиною заміни рейок є тріщиноподібні дефекти в головці, які формуються шляхом викришування та відшарування металу з поверхні кочення головки рейки [1]. Додамо також, що в роботі [4] виявлено велику вірогідність утворення таких дефектів контактної втоми походження.

Для моделювання контактної взаємодії колеса з рейкою часто використовують двовимірну модельну схему, запропоновану Л. М. Кіром і М. Д. Брайантом [9], коли пошкоджене тріщиною тіло моделюють пружною півплощиною з крайовим розрізом, а дію контртіла – однонаправленим переміщенням герцівського (еліптичного) тиску вздовж краю півплощини з врахуванням сили тертя між колесом і рейкою. У роботах [3, 6, 8, 13] зроблено огляд літератури про визначення КІН у вершині тріщини за такого підходу. Подібну модельну схему застосували і в даній роботі, а для отримання числових результатів використали метод сингулярних інтегральних рівнянь (СІР) [2].

Мета

Метою статті є дослідження впливу рухомого контактного навантаження від дії коліс на поверхневі тріщини в головках залізничних рейок, зокрема, виявлення орієнтацій крайових тріщин, найсприятливіших для їх розвитку в зоні стиску, а також прогнозування їх поведінки.

Методика

Замість пошкодженої поверхневою тріщиноподібним дефектом залізничної рейки у двовимірному формуванні розглядаємо пружну півплощину з крайовою прямолінійною довільно орієнтованою тріщиною (рис. 2). Півплощину відносимо до системи координат xOy , вісь Ox якої збігається з краєм півплощини, а початок O – з гирлом тріщини. Саму тріщину відносимо до локальної системи координат $x_1O_1y_1$ з початком у гирлі. Контактний тиск колеса на рейку моделюємо однонаправленим повторним поступальним переміщенням уздовж краю півплощини (справа наліво) герцівських контактних зусиль з дотичною складовою:

$$s(x) = -(1 + if_s)p(x) = -p_0(1 + if_s)\sqrt{a^2 - (x - x_0)^2}/a, \quad |x - x_0| \leq a \quad (1)$$

де f_s – коефіцієнт тертя проковзування між тілами кочення, p_0 – максимальне значення контактної тиску, $2a$ – довжина ділянки контакту. Розташування ділянки контакту відносно гирла тріщини визначає параметр $\lambda = x_0/a$, відносну довжину тріщини – параметр $\varepsilon = l/a$, а її орієнтацію – кут β .

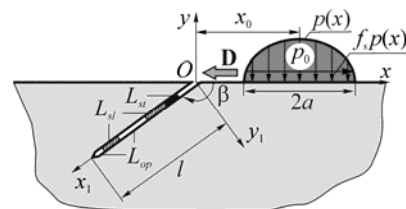


Рис. 2. Схема головки рейки з крайовою тріщиною під дією модельного контактної навантаження:

D – напрям руху контактної навантаження

Fig. 2. Scheme of rail head with an edge crack under action of model contact load:

D – direction of contact load motion

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Крайові умови задачі на межі півплощини матимуть вигляд:

$$\sigma_y(x, 0) - i\tau_{xy}(x, 0) = \begin{cases} s(x), & |x - x_0| \leq a \\ 0, & |x - x_0| > a \end{cases}. \quad (2)$$

Береги тріщини за певних розташувань герцівського навантаження (певних λ) можуть контактувати. Нижче розглянуто загальний випадок умов їх контакту, а саме: проковзування з тертям та можливістю защемлення або розкриття. Тоді граничні умови задачі на берегах тріщини будуть такими:

$$N^\pm(x_1) + iT^\pm(x_1) = 0, \quad x_1 \in L_{op}; \quad (3)$$

$$v^+(x_1) - v^-(x_1) = 0, \quad x_1 \in L_{sl}; \quad (4)$$

$$T^\pm(x_1) = f_c \operatorname{sign}[T^\pm(x_1)] |N^\pm(x_1)|, \quad x_1 \in L_{sl}; \quad (5)$$

$$u^+(x_1) - u^-(x_1) + i[v^+(x_1) - v^-(x_1)] = 0, \quad x_1 \in L_{sl}; \quad (6)$$

$$N^+(x_1) - N^-(x_1) + i[T^+(x_1) - T^-(x_1)] = 0, \quad x_1 \in L_{sl}. \quad (7)$$

При цьому на ділянках защемлення берегів тріщини виконується умова

$$|T^\pm(x_1)| < f_c |N^\pm(x_1)|, \quad x_1 \in L_{sl}. \quad (8)$$

Тут контур L прямолінійної тріщини складається з сукупності ділянок L_{op} , на яких тріщина відкрита, ділянок L_{sl} , на яких береги тріщини проковзують, та ділянок L_{st} , де вони защемлені. Через f_c позначено коефіцієнт тертя між берегами тріщини, а через N і T , v і u – відповідно нормальні і дотичні складові зусиль на берегах тріщини та переміщень її берегів у локальній системі координат $x_1 O_1 y_1$. Верхні індекси «+» або «-» означають граничні значення величин за наближення зверху або знизу до контуру тріщини відповідно.

Задачу зводимо до розв'язування системи двох дійсних СІР відносно невідомих стрибків похідних від нормальних і дотичних зміщень [2]. Систему цих рівнянь розв'язуємо числовим методом механічних квадратур Гаусса-Чебишова і на основі цього розв'язку за відомою формулою знаходимо КІН K_I і K_{II} у вершині тріщини.

Складність задачі полягає в тому, що межі ділянок контакту і розкриття берегів тріщини наперед невідомі. Їх визначаємо одночасно з розв'язуванням інтегральних рівнянь задачі з додаткових умов рівності нулю нормальних контактних напружень у граничних точках, а границі зон защемлення і проковзування самих ділянок контакту встановлюємо на основі додаткової умови (8).

Вважаємо [3], що в загальному випадку під час переміщення контактної навантаження (коліс по рейці) поверхневі тріщини можуть розвиватися як за зсувним, так і за розривним механізмами, а саме: в зоні стискування шляхом поперечного зсуву, а в інших умовах – здебільш нормальним розривом. В умовах контактної втоми кочення зростання тріщини за зсувним і розривним механізмами контролюється КІН мішаного типу, які описуються такими співвідношеннями:

$$K_{II\theta} = \cos(\theta^*/2) [K_I \sin \theta^* + K_{II} (3 \cos \theta^* - 1)] / 2; \quad (9)$$

$$K_{I\theta} = \cos^3(\theta^*/2) [K_I - 3K_{II} \operatorname{tg}(\theta^*/2)]. \quad (10)$$

Кут початкового відхилення тріщини θ^* за руйнування зсувом визначається з рівняння

$$2K_{II} \operatorname{tg}^3(\theta^*/2) - 2K_I \operatorname{tg}^2(\theta^*/2) - 7K_{II} \operatorname{tg}(\theta^*/2) + K_I = 0, \quad (11)$$

а в разі руйнування розривом – за формулою

$$\theta^* = 2 \operatorname{arctg} \left[(K_I - \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}) / (4K_{II}) \right]. \quad (12)$$

Коли ж в умовах стискування $K_I = 0$, то згідно з (11) тріщина розвиватиметься за зсувним механізмом уздовж свого продовження ($\theta^* = 0$).

Числові результати та їх обговорення

Отримано числові розв'язки (значення КІН) сингулярних інтегральних рівнянь контактної задачі теорії пружності для півплощини з крайовою тріщиною, береги якої контактують під час переміщення герцівського навантаження (тиску) вздовж границі півплощини. Побудовано залежності розмаху КІН в циклі контакту ΔK_{II} (який контролює ріст тріщин за механіз-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

мом поперечного зсуву) від кута $\Delta K_{II} \beta$ – орієнтації крайової тріщини з урахуванням коефіцієнта тертя між колесом і рейкою f_s , коефіцієнта тертя між берегами тріщини f_c та відносної довжини тріщини $\varepsilon = l/a$ (рис. 3, 4). Розрахунки здійснювали для крайової довільно орієнтованої тріщини з відносними довжинами $\varepsilon = 0,1; 0,3; 0,5$, кут орієнтації β якої змінювали від 5°C до 175°C . Значення експлуатаційних параметрів для системи «колесо-рейка» обрали такі: коефіцієнт тертя проковзування в контакті кочення $f_s = 0; 0,1; 0,3$ та коефіцієнт тертя між берегами тріщини в рейці $f_c = 0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7$.

Дослідження розмаху КІН ΔK_{II} провели за фіксованого коефіцієнта тертя між колесом і рейкою $f_s = 0,1$ для різних відносних довжин тріщини $\varepsilon = l/a$ (рис. 3), а також, коли зафіксовано відносну довжину тріщини $\varepsilon = 0,3$ – для різних коефіцієнтів тертя f_s між колесом і рейкою (рис. 4).

Спільною властивістю для кривих на графіках (див. рис. 3, 4) є наявність двох максимумів ΔK_{II} за кутів $\beta = \beta_1^*$ і $\beta = \beta_2^*$, які відповідають найсприятливішим орієнтаціям для росту зсувної тріщини, яка нахилена або в бік напрямку руху колеса (коли кут $\beta = \beta_2^* > \pi/2$ – пологий), або ж у напрямі, близькому до перпендикулярного (коли кут $\beta = \beta_1^* \leq \pi/2$). Як видно з рис. 3, зі збільшенням відносної довжини тріщини ε ($0 < \varepsilon \leq 0,5$) значення обох максимумів ΔK_{II} збільшуються. Очевидно, що при подальшому збільшенні величини ε наступить такий момент, коли і $|K_{II}|$ і максимуми ΔK_{II} будуть зменшуватися, оскільки вершина тріщини віддалятиметься від межі півплощини, де діє герцівське навантаження. Обидва максимуми ΔK_{II} суттєво збільшуються також зі збільшенням коефіцієнта тертя f_s в контакті кочення (див. рис. 4). Зокрема для кута $\beta = \beta_2^*$ при $\varepsilon = 0,3$ зі збільшенням коефіцієнта тертя f_s у контакті кочення від 0,1 до 0,3 величина $\Delta K_{II}(\beta_2^*)$ зростає в 2,5 рази для $f_c = 0,3$ і в 2,6 рази для $f_c = 0,5$. Це важливо знати, оскільки відомо [3], що кое-

фіцієнт тертя $f_s = 0,1$ відповідає тертю між колесом і рейкою за вологої погоди, а $f_s = 0,3$ – за сухої погоди. Отже, зміна погодних умов суттєво змінює величину розмаху ΔK_{II} для поверхневих тріщин у рейках.

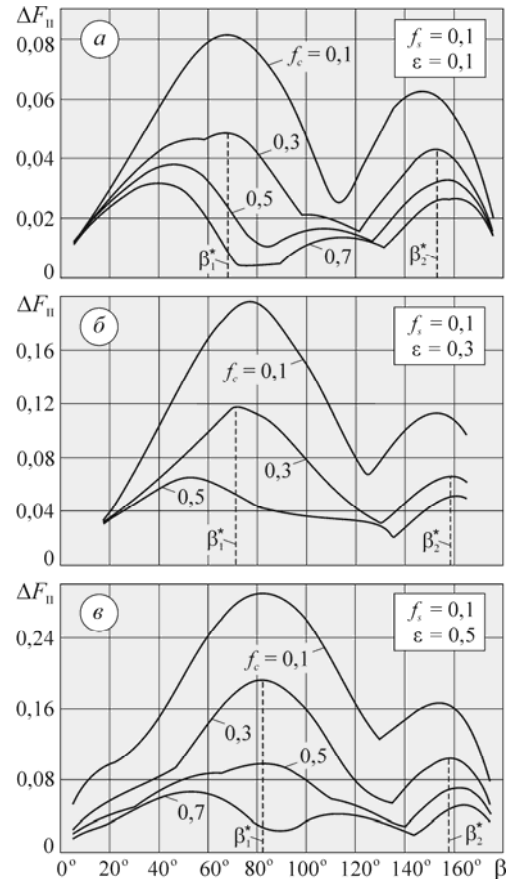


Рис. 3. Залежність нормованого розмаху КІН $\Delta F_{II} = \Delta K_{II} / (p_0 \sqrt{\pi a})$ від кута β орієнтації тріщини для різних її відносних довжин $\varepsilon = l/a$, $f_s = 0,1$: а – $\varepsilon = 0,1$; б – $\varepsilon = 0,3$; в – $\varepsilon = 0,5$

Fig. 3. Dependence of normalized range of SIF $\Delta F_{II} = \Delta K_{II} / (p_0 \sqrt{\pi a})$ on angle β of crack orientation for various relative lengths $\varepsilon = l/a$, $f_s = 0,1$: а – $\varepsilon = 0,1$; б – $\varepsilon = 0,3$; в – $\varepsilon = 0,5$

Залежності $\Delta K_{II}(\beta, f_s, f_c, \varepsilon)$ на рис. 3 і 4 свідчать, що суттєвий вплив на величину ΔK_{II} має також коефіцієнт тертя f_c між контактуючими берегами тріщини: зі збільшенням тертя між берегами ΔK_{II} значно зменшуються. Так, наприклад, якщо порівнювати значення максимумів ΔK_{II} при коефіцієнті тертя $f_c = 0,1$ з від-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

повідними значеннями, коли $f_c = 0,5$ (див. рис. 4, б; $f_s = 0,1$ і $\varepsilon = 0,3$) для обох кутів $\beta = \beta_1^*$ і $\beta = \beta_2^*$, то бачимо, що таке посилення тертя викликає зменшення $\Delta K_{II}(\beta_1^*)$ в 2,7 рази, а $\Delta K_{II}(\beta_2^*)$ в 2,2 рази. Таким чином, прогнозування експлуатаційного ресурсу (довговічності) рейки без урахування наявного тертя між берегами тріщини може бути помилковим [3].

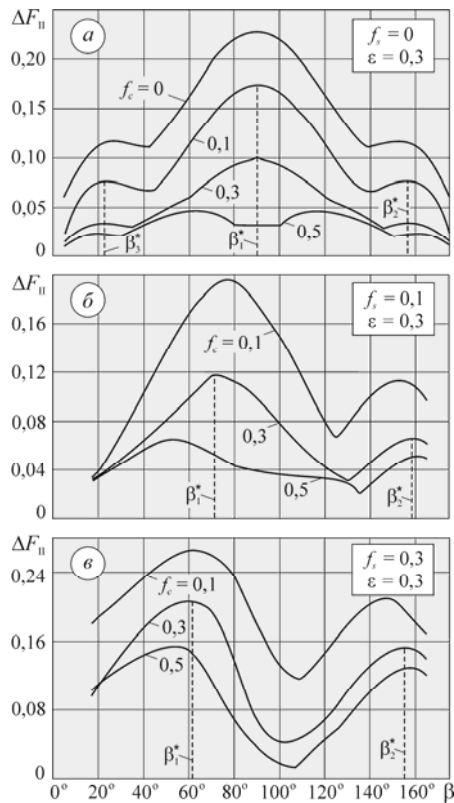


Рис. 4. Залежність нормованого розмаху КІН $\Delta F_{II} = \Delta K_{II} / (p_0 \sqrt{\pi a})$ від кута β орієнтації тріщини для різних коефіцієнтів тертя f_s між колесом і рейкою, $\varepsilon = l/a = 0,3$: а – $f_s = 0$; б – $f_s = 0,1$; в – $f_s = 0,3$

Fig. 4. Dependence of normalized range of SIF $\Delta F_{II} = \Delta K_{II} / (p_0 \sqrt{\pi a})$ on angle β of crack orientation for various friction coefficient f_s between wheel and rail, $\varepsilon = l/a = 0,3$: а – $f_s = 0$; б – $f_s = 0,1$; в – $f_s = 0,3$

І, на кінець, перейдемо до головного питання про виявлення кута, найсприятливішого для поширення зсувних поверхневих тріщин в головці рейки. Не дуже зрозуміло, яким буде цей кут: $\beta = \beta_1^*$ чи $\beta = \beta_2^*$. Так, зі збільшенням кое-

фіцієнта тертя f_s і зменшенням відносної довжини ε тріщини різниця між максимумами $\Delta K_{II}(\beta_1^*)$ і $\Delta K_{II}(\beta_2^*)$ суттєво зменшується. Важливим є і те, що кут β_2^* стабільніший (мало змінюється), ніж β_1^* по відношенню до зміни довжини тріщини, а також коефіцієнта тертя f_s між колесом та рейкою.

На перший погляд виглядає, що найсприятливішим кутом поширення зсувної тріщини є кут $\beta = \beta_1^*$. Але якщо до цих досліджень додатково провести розрахунок величини $\max K_{I0}$, який контролює ріст тріщини за розривним механізмом, то виявляється, що $\max K_{I0}(\beta_1^*) > \max K_{I0}(\beta_2^*)$ (табл. 1; $f_s = 0,3$; $\varepsilon = 0,5$). Крім того, значення величин $\max \Delta K_{II}$, що відповідають найсприятливішим для поширення тріщини за зсувним механізмом напрямкам (кути β_1^* і β_2^*), порівнювали з пороговими значеннями характеристик циклічної тріщиностійкості на поперечний зсув $K_{II,th} = 13,01 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$, а знайдені значення $\max K_{I0}$ – із пороговими (на розрив) $K_{I,th} = 4,3 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ для рейкових сталей [7].

Таблиця 1

Порівняння двох механізмів руйнування за критичних кутів β_k^* ($k = 1, 2$) орієнтації крайової тріщини; $f_s = 0,3$; $\varepsilon = 0,5$; $p_0 = 1100 \text{ МПа}$; $a = 7 \text{ мм}$

Table 1

Comparison of two mechanisms of destruction for critical angles β_k^* ($k = 1, 2$) of the orientation of the edge crack; $f_s = 0,3$; $\varepsilon = 0,5$; $p_0 = 1100 \text{ МПа}$; $a = 7 \text{ мм}$

f_c	k	β_k^*	$\text{МПа} \sqrt{\text{м}}$	
			$\max \Delta K_{II}$	$\max K_{I0}$
0,1	1	68°	55,45	9,30
	2	152°	39,35	8,23
0,3	1	66°	41,87	9,35
	2	160°	27,06	8,37
0,5	1	64°	28,62	9,41
	2	162°	21,98	8,08

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Як бачимо, тріщини, що найближчі до вертикальних (орієнтовані під кутами $\beta = \beta_1^*$), більш схильні розвиватися за розривним механізмом у порівнянні з пологими тріщинами ($\beta = \beta_2^*$) за даних значень параметрів ε , f_c , f_s і p_0 . Таким чином, напрям під кутом $\beta = \beta_2^* \approx 150^\circ \dots 160^\circ$ є сприятливішим для росту зсувної тріщини у порівнянні з напрямом під кутом $\beta = \beta_1^*$. Додамо також, що отримані результати добре узгоджуються з інженерними та експериментальними даними.

Отже, з урахуванням отриманих числових даних і вищенаведених міркувань, кут $\beta = \beta_2^*$ вважатимемо характеристичним і пропонуємо визначати цей кут, виходячи з таких умов:

$$\frac{\partial}{\partial \beta} [\Delta K_{II}(\beta, l, p_0, f_s, f_c)]_{\beta=\beta_k^*} = 0, \quad k = 1, 2; \quad (13)$$

$$\Delta K_{II}(\beta_2^*, l, p_0, f_s, f_c) > \Delta K_{II,th}; \quad (14)$$

$$\max K_{I0}(\beta_1^*, l, p_0, f_s) < \max K_{I0}(\beta_1^*, l, p_0, f_s); \quad (15)$$

$$\max K_{I0}(\beta_1^*, l, p_0, f_s) > \Delta K_{I,th}, \quad (16)$$

де параметри l, p_0, f_s і f_c – фіксовані. Аналіз таких контактних пошкоджень, як пітинг (див. рис. 1, а), ліва вітка «нори» (див. рис. 1, б), «риски» (див. рис. 1, в) показує, що ці пошкодження починаються власне із крайової тріщини, яка нахилена під характеристичним кутом.

Слід додати, що для окремого випадку коефіцієнта тертя в контактні між колесом і рейкою $f_s = 0$ крива $\Delta K_{II}(\beta)$ має ще один додатковий максимум, а отже, маємо ще один сприятливий напрям для поширення тріщини зсувом, коли $\beta = \beta_3^* = 15^\circ - 20^\circ$ (рис. 4, а). Тут висловимо припущення, що за $f_s = 0$ (наприклад, коли колеса вагонів котяться за інерцією) створюються умови для виникнення правої вітки пошкодження типу «нора» (див. рис. 1, б).

Наукова новизна та практична значимість

Вперше, на відміну від інших робіт, на основі отриманих числових даних теоретично встановлено величину характеристичного кута, під яким формуються на початковій стадії поверхневі контактні-втомні пошкодження в головці залізничної рейки від дії коліс. Отримані дані дозволяють прояснити природу поверхневих пошкоджень рейок за різних умов експлуатації залізничної колії.

Висновки

Теоретично встановлено наявність характеристичного кута поширення поверхневих тріщин в головці рейки за механізмом поперечного зсуву і записано умови для його визначення. Цей кут є базовим у формуванні типових поверхневих контактних-втомних пошкоджень, таких, як пітинг, «риски», ліва вітка «нори» тощо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Агарков, О. В. Аналіз проблематики утворення дефектів в рейках залізничної колії / О. В. Агарков // Вісн. нац. трансп. ун-ту : наук.-техн. зб. – Київ, 2013. – № 28. – С. 3–8.
2. Вплив стискальних залишкових напружень на поширення зсувних поверхневих тріщин у залізничних рейках / О. П. Дацишин, Г. П. Марченко, А. Ю. Глазов, А. Б. Левус // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2015. – № 2. – С. 83–90.
3. Дацишин, О. П. Довговічність і руйнування твердих тіл під час їх контактної циклічної взаємодії / О. П. Дацишин // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2005. – № 6. – С. 5–25.
4. Йосифович, Р. М. Дослідження залишкового ресурсу дефектних рейок типу Р50 із випробуванням на циклічну витривалість // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 78–87. doi: 10.15802/stp2015/57027.
5. 3D characterization of rolling contact fatigue crack networks / C. Jessop, J. Ahlstrom, L. Hammar [et al.] // Wear. – 2016. – Vol. 366–367. – P. 392–400. doi: 10.1016/j.wear.2016.06.027.
6. Beggini, M. An application of the weight function technique to inclined surface cracks under rolling contact fatigue, assessment and parametric analysis / M. Beggini, C. Santus // Engineering Fracture Mechanics. – 2013. – Vol. 98. – P. 153–168. doi: 10.1016/j.engfracmech.2012.10.024.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

7. Datsyshyn, O. P. The model of the residual life time estimation of trybojoint elements by formation criteria of the typical contact fatigue damages / O. P. Datsyshyn, V. V. Panasyuk, A. Yu. Glazov // Intern. J. of Fatigue. – 2016. – Vol. 83, pt. 2. – P. 300–312. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2015.10.026.
8. Fletcher, D. I. Rail rolling contact fatigue dependence on friction, predicted using fracture mechanics with a three-dimensional boundary element model / D. I. Fletcher, L. Smith, A. Kapoor // Engineering Fracture Mechanics. – 2009. – Vol. 76. – Iss. 17. – P. 2612–2625. doi: 10.1016/j.engfracmech.2009.02.019.
9. Keer, L. M. A pitting model for rolling contact fatigue / L. M. Keer, M. D. Bryant // Transactions of the ASME : J. of Lubrication Technology. – 1983. – Vol. 105. – Iss. 2. – P. 198–205. doi: 10.1115/1.3254565.
10. Miller, K. J. Structural integrity – whose responsibility? / K. J. Miller // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part L : J. of Materials Design and Applications. – 2003. – Vol. 217. – Iss. 1. – P. 1–21. doi: 10.1243-/14644200360539391.
11. Modelling wear and rolling contact fatigue: Parametric study and experimental results / G. Trummer, C. Martte, S. Scheriau [et al.] // Wear. – 2016. – Vol. 366–367. – P. 71–77. doi: 10.1016/j.wear.-2016.04.024.
12. Murakami, Y. Mechanism of rolling contact fatigue and measurement of ΔK_{Ith} for steels / Y. Murakami, C. Sakae, S. Hamada // Engineering Against Fatigue : Proceedings of the Conference. – Rotterdam, 1999. – P. 473–485.
13. Ringsberg, J. W. On propagation of short rolling contact fatigue cracks / J. W. Ringsberg, A. Bergkvist // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. – 2003. – Vol. 26. – Iss. 10. – P. 969–983. doi: 10.1046/j.1460-2695.2003.00657.x.
14. Study on wear and rolling contact fatigue behaviors of wheel/rail materials under different slip ratio conditions / L. Ma, C. G. He, X. J. Zhao [et al.] // Wear. – 2016. – Vol. 366–367. – P. 13–26. doi: 10.1016/j.wear.2016.04.028.
15. The competitive role of wear and RCF in a rail steel / G. Donzella, M. Faccoli, A. Ghidini [et al.] // Engineering Fracture Mechanics. – 2005. – Vol. 72. – Iss. 2. – P. 287–308. doi: 10.1016/j.engfracmech.2004.04.011.
16. Zerbst, U. Damage tolerance investigations on rails / U. Zerbst, M. Schödel, R. Heyder // Engineering Fracture Mechanics. – 2009. – Vol. 76. – Iss. 17. – P. 2637–2653. doi: 10.1016/j.engfracmech.2008.-04.001.

А. П. ДАЦЬШИН¹, Г. П. МАРЧЕНКО^{2*}, А. Ю. ГЛАЗОВ³

¹Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка НАН України, ул. Научная, 5, Львов, Україна, 79601, тел./факс +38 (032) 263 73 34, ел. пошта datsyshy@ipm.lviv.ua, ORCID 0000-0003-0364-148X

^{2*}Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка НАН України, ул. Научная, 5, Львов, Україна, 79601, тел./факс +38 (032) 263 73 34, ел. пошта mhr@ipm.lviv.ua, ORCID 0000-0003-0767-4561

³Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка НАН України, ул. Научная, 5, Львов, Україна, 79601, тел./факс +38 (032) 263 73 34, ел. пошта glazov@ipm.lviv.ua, ORCID 0000-0002-7664-4879

О ПОВЕРХНОСТНОМ РАЗРУШЕНИИ ГОЛОВОК ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

Цель. Образование трещиноподобных дефектов в рельсах железнодорожного пути является серьезной проблемой для инженерной практики из-за опасности создания аварийных ситуаций. Целью этой работы есть теоретическое установление характеристического угла распространения поверхностных трещин в головках железнодорожных рельсов, который является главным фактором в формировании типичных поверхностных контактно-усталостных повреждений, таких как «питинг», «черточки», «нора» и т. п. Необходимо также найти условия для определения этого угла. **Методика.** Исследования проводили на основании метода сингулярных интегральных уравнений. Поврежденный поверхностной трещиной рельс моделировали как полуплоскость с краевым разрезом, а действие колеса на рельс – как однонаправленное повторное поступательное перемещение вдоль края полуплоскости с герцевскими контактными усилиями, с касательной составляющей. Задачу определения коэффициентов интенсивности напряжений вблизи вершины трещины в головке рельса свели к системе двух действительных сингулярных интегральных уравнений, которые решили численно – методом механических квадратур Гаусса-Чебышева. Сложность задачи состоит в том, что границы участков контакта и раскрытия берегов трещины заранее неизвестны и меняются во время перемещения модельных контактных усилий. Эти границы определяли одновременно с решением интегральных уравнений задачи по дополнительным условиям методом итераций. **Результаты.** Теоретически установлено нали-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

чие в головке рельса характеристического угла распространения поверхностных трещин по механизму поперечного сдвига и записаны условия для его определения. Полученные результаты хорошо согласуются с инженерными и экспериментальными данными. **Научная новизна.** Впервые теоретически найдены величины характеристического угла, под которым на начальной стадии распространяются поверхностные контактно-усталостные трещины в головке железнодорожного рельса от действия колес. Также записаны условия для определения этого угла. **Практическая значимость.** Полученные данные имеют важное значение для инженерной практики, поскольку выявляют природу поверхностных контактно-усталостных дефектов рельсов при разных условиях эксплуатации железнодорожного пути и позволяют прогнозировать их контактную прочность и долговечность.

Ключевые слова: железнодорожный рельс; герцевская нагрузка; трение; сдвиговая трещина; коэффициенты интенсивности напряжений; характеристический угол

О. Р. DATSYSHYN¹, Н. Р. MARCHENKO^{2*}, А. Ю. GLAZOV³

¹Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, 5, Lviv, Naukova St., Ukraine, 79601, tel./fax +38 (032) 263 73 34, e-mail datsyshy@ipm.lviv.ua, ORCID 0000-0003-0364-148X

^{2*}Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, 5, Lviv, Naukova St., Ukraine, 79601, tel./fax +38 (032) 263 73 34, e-mail mhp@ipm.lviv.ua, ORCID 0000-0003-0767-4561

³Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, 5, Lviv, Naukova St., Ukraine, 79601, tel./fax +38 (032) 263 73 34, e-mail glazov@ipm.lviv.ua, ORCID 0000-0002-7664-4879

ON SURFACE FRACTURE OF RAIL HEADS

Purpose. The formation of crack-like defects in rails of railway tracks is a serious problem for engineering practice because of the danger of creating emergency situations. The purpose of this work is to establish theoretically the characteristic angle of propagation of surface cracks in the rail heads of railway rails, which is basic in the formation of typical surface contact fatigue damages, such as pitting, «checks» and «squat». It is also necessary to find the conditions for determining this angle. **Methodology.** The investigations were carried out on the basis of the method of singular integral equations. The rail damaged by the surface crack was modeled with a half-plane with an edge cut, and the action of the wheel on the rail by unidirectional repeated translational movement along the edge of the half-plane of the Hertzian contact forces with the tangential component. The problem of determining the stress intensity factors in the vicinity of the crack tip in the rail head was reduced to a system of two real singular integral equations which were solved numerically by the Gauss-Chebyshev mechanical quadrature method. The complexity of the problem consists in the fact that the boundaries of the contact areas and the opening of the crack faces are unknown beforehand and they change when the model contact forces move. These boundaries were determined simultaneously with solving the integral equations of the problem from additional conditions by the iteration method. **Findings.** The presence of the characteristic angle of propagation of mode II surface cracks in the rail head has been established theoretically and the conditions for its determination have been put down. The results obtained are in good agreement with engineering and experimental data. **Originality.** For the first time, the values of the characteristic angle were theoretically determined, under which at the initial stage, the surface contact fatigue cracks propagate in the head of the railway rail under the action of the wheels. Conditions for determining this angle have been also put down. **Practical value.** The received data are of great importance for engineering practice, since they reveal the nature of surface contact fatigue defects under various operating conditions and allow to predict their contact strength and durability.

Keywords: railway rail; Hertzian load; friction; shear crack; stress intensity factors; characteristic angle

REFERENCES

1. Agarkov, O. V. (2013). The analysis of terms of rail crack creation. *Herald of National Transport University*, 28, 3-8.
2. Datsyshyn, O. P., Marchenko, H. P., Glazov, A. Y., & Levus, A. B. (2015). The effect of compressing residual stresses on the propagation of shear surface cracks in railway rails. *Physicochemical Mechanics of Materials*, 51(2), 83-90.
3. Datsyshyn, O. P. (2005). Durability and fracture of solids during their contact cyclical interaction. *Physicochemical Mechanics of Materials*, 6, 5-25.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

4. Yosyfovych, R. M. (2015). Residual resource study of defective rails for type P50 cycle test of endurance. *Science and Transport Progress*, 6(60), 78-87. doi:10.15802/stp2015/57027
5. Jessop, C., Ahlstrom, J., Hammar L., FASTER S., & Danielsen, H. K. (2016). 3D characterization of rolling contact fatigue crack networks. *Wear*, 366-367, 392-400. doi:10.1016/j.wear.2016.06.027
6. Beghini, M., & Santus, C. (2013). An application of the weight function technique to inclined surface cracks under rolling contact fatigue, assessment and parametric analysis. *Engineering Fracture Mechanics*, 98, 153-168. doi:10.1016/j.engfracmech.2012.10.024
7. Datsyshyn, O. P., Panasyuk, V. V., & Glazov, A. Y. (2016). The model of the residual life time estimation of trybojoint elements by formation criteria of the typical contact fatigue damages. *International Journal of Fatigue*, 83(2), 300-312. doi:10.1016/j.ijfatigue.2015.10.026
8. Fletcher, D. I., Smith, L., & Kapoor, A. (2009). Rail rolling contact fatigue dependence on friction, predicted using fracture mechanics with a three-dimensional boundary element model. *Engineering Fracture Mechanics*, 76, 2612-2625. doi:10.1016/j.engfracmech.2009.02.019
9. Keer, L. M., & Bryant, M. D. (1983). A pitting model for rolling contact fatigue. *Transactions of the ASME: Journal of Lubrication Technology*, 7(2), 198-205. doi:10.1115/1.3254565
10. Miller, K. J. (2003). Structural integrity – whose responsibility? *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications*, 217(1), 1-21. doi:10.1243/14644200360539391
11. Trummer, G., Marte, C., Scheriau, S., Dietmaier, P., Sommitsch, C., & Six, K. (2016). Modelling wear and rolling contact fatigue: Parametric study and experimental results. *Wear*, 366-367, 71-77. doi:10.1016/j.wear.2016.04.024
12. Murakami, Y., Sakae, C., & Hamada, S. (1999). Mechanism of rolling contact fatigue and measurement of ΔK_{Ith} for steels. *Engineering Against Fatigue*. (pp. 473-485). Rotterdam: A. A. Balkema.
13. Ringsberg, J. W., & Bergkvist, A. (2003). On propagation of short rolling contact fatigue cracks. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 26(10), 969-983. doi:10.1046/j.1460-2695.2003.00657.x
14. Ma, L., He, C. G., Zhao, X. J., Guo, J., Zhu, Y., Wang, W. J., & ... Jin, X. S. (2016). Study on wear and rolling contact fatigue behaviors of wheel/rail materials under different slip ratio conditions. *Wear*, 366-367, 13-26. doi:10.1016/j.wear.2016.04.028
15. Donzella, G., Faccoli, M., Ghidini, A., Mazzu, A., & Roberti, R. (2005). The competitive role of wear and RCF in a rail steel. *Engineering Fracture Mechanics*, 72(2), 287-308. doi:10.1016/j.engfracmech.2004.04.011
16. Zerbst, U., Schödel, M., & Heyder R. (2009). Damage tolerance investigations on rails. *Engineering Fracture Mechanics*, 76 (17), 2637-2653. doi:10.1016/j.engfracmech.2008.04.001

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. І. М. Дмитрахом (Україна);
д.т.н., проф. М. Б. Курганом (Україна)

Надійшла до редколегії: 06.04.2017

Прийнята до друку: 12.07.2017