

УДК 539.375:620.178

МОДЕЛЮВАННЯ УТВОРЕННЯ КОНТАКТНО-ВТОМНИХ ПОШКОДЖЕНЬ І ОЦІНЮВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ТРИБОСПРЯЖЕНЬ

О. П. ДАЦИШИН

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

Наведено розрахункову модель для дослідження руйнування і оцінювання залишкової довговічності твердих тіл за їх циклічної контактної взаємодії. Основою моделі є покрокова побудова траєкторій розвитку тріщин у зоні контакту з урахуванням експлуатаційних параметрів трибоз'єднання та характеристик циклічної тріщиностійкості матеріалів його елементів. Модель застосовано для контактних взаємодій кочення і фретинг-втоми. Досліджено особливості і причини формування таких типових контактних пошкоджень, як пітинг, відшарування, темна пляма, системне розкришування. З використанням характеристик циклічної тріщиностійкості рейкових сталей на поперечний зсув та розрив оцінено їх довговічність за розвитком пітингу. Синтезовано основні результати з цієї проблеми, одержані за останнє десятиріччя.

Ключові слова: *траєкторії розвитку тріщин, формування пошкоджень, довговічність, контактна втома кочення, фретинг-втома.*

Однією з найпоширеніших форм механічного пошкодження твердих тіл у зоні їх циклічного контакту є тріщиноутворення. Тріщини, які pojawiaються в поверхневих шарах зон співдотику, можуть, зростаючи, утворювати ямки, відшарування, розкришування поверхні, спричиняючи макрозношування та втрату її роботоздатності. Нерідко від приповерхневих тріщин поширюється магістральна, яка руйнує виріб. Зародження і розвиток тріщин у зоні контакту тіл найчастіше спостерігають за умов фретинг-втоми, кочення, пульсівного контакту, фрикційної втоми тощо. Контактна втома кочення характерна для таких трибосистем, як колесо-рейка, опорний і робочий валки вальцювальних станів, різноманітні зубчасті зачеплення, кулькові та роликові підшипники тощо. А контактну довговічність, як механічну характеристику тіл кочення, часто визначають як термін служби (в годинах або кількості обертів), впродовж якого вони працюють під заданим навантаженням без викришування або відшарування поверхні кочення. Фретинг-втома реалізується у вузлах машин та конструкцій, елементи яких знають незначних коливних взаємних проковзувань, викликаних здебільшого експлуатаційними вібраціями. Особливо це стосується з'єднань у корпусах і обшивках різноманітних засобів транспорту (автомобілів, літаків, ракет, кораблів) та багатьох конструкцій промислового призначення (турбін АЕС, газотурбінних двигунів, нафтових платформ, мостів, трубопроводів), а також різноманітних шліцьових, болтових і шпонкових з'єднань.

Донедавна для вивчення втомного контактного руйнування в основному використовували феноменологічні підходи, узагальнюючи результати комплексних експериментальних випробувань. У 1975 р. Б. Лоун та Т. Уілшоу [1] опублікували фундаментальний огляд з аналізом досліджень і окресленням деяких перспектив-

них напрямків з цієї тематики. У 70–90-х роках минулого сторіччя сформульовано теоретичні моделі з механіки втомного контактного руйнування, зокрема для фретинг-втоми [2–4] та кочення [5–7]. Ці та запропоновані пізніше моделі (див. огляд у праці [8]) ґрунтуються на концепціях механіки втомного руйнування, розв’язках контактних задач теорії пружності для тіл з тріщинами і на врахуванні визначальних експлуатаційних параметрів того чи іншого типу контактної взаємодії тіл у трибоспряженні. Здебільш у цих моделях (двовимірних) траєкторію розвитку тріщини і довговічність спрощено прогнозують за підростанням прямолінійної зсувної макротріщини (крайової або підповерхневої) в зоні контакту, а пізніше, коли тріщина входить у зону розтягу, – за напрямком (кутом) її початкового відхилення. Насправді під час циклічного контактування тіл, за складного напруженого стану в зоні їх контакту, тріщини ростуть уздовж криволінійних траєкторій. При цьому росте одна або система тріщин, реалізуючи різноманітні типи пошкоджень поверхневого шару елемента трибоспряження: ямкування (pitting), відшарування (spalling), розкришування (stacking), затемнення і осідання поверхні через підповерхнє галуження тріщин – темну пляму (squat, dark-spot) тощо. Відгалуження темної плями вглиб матеріалу часто переростає у небезпечну магістральну тріщину, яка руйнує виріб. Ці процеси є предметом сучасних досліджень з механіки руйнування і вимагають розроблення адекватних розрахункових моделей та математичних алгоритмів побудови траєкторій розвитку тріщин за умов зміни напружено-деформованого стану внаслідок росту тріщин та взаємного циклічного переміщення тіл.

Нижче наведено числово-аналітичну модель для вивчення росту макротріщин та оцінювання залишкової довговічності твердих тіл за їх циклічної контактної взаємодії. Основою моделі є критерії руйнування матеріалу під час росту втомних тріщин, а також алгоритми покрокової побудови траєкторій їх розвитку, розроблені з використанням сингулярних інтегральних рівнянь (СІР) двовимірних контактних задач теорії пружності для тіл з криволінійними тріщинами [9]. Модель враховує перерозподіл напружень, пов’язаний і з ростом тріщини, і зі зміною навантаження в циклі контактування, а також характеристики циклічної тріщиностійкості матеріалу. Вона реалізована для контактних взаємодій кочення і фретинг-втоми. За моделлю досліджено деякі особливості формування таких контактних пошкоджень, як пітинг, відшарування, темна пляма, розкришування поверхні контакту. Найбільш вичерпно модель сформульовано в праці [8], для кочення – в публікаціях [8, 10–13], а для фретинг-втоми – в [8, 14, 15]. Тут також проаналізовано основні результати, одержані з цієї проблеми впродовж 2001–2010 рр.

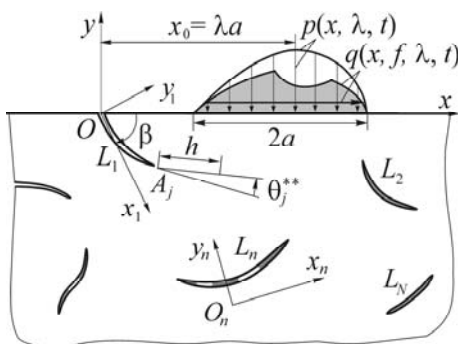


Рис. 1. Розрахункова схема моделі.

Fig. 1. Computational scheme of the model.

Базова розрахункова модель. Розглянемо циклічну контактну взаємодію двох тіл, одне з яких пошкоджене тріщинами. Це тіло моделюємо пружною півплощиною, послабленою системою тріщин (рис. 1), а дію другого тіла (контртіла) – розподіленими нормальними $p(x, \lambda, t)$ і дотичними $q(x, f, \lambda, t)$ зусиллями на краю півплощини. Ці зусилля розподілені на відрізок $2a$ і залежать від форми і розмірів контртіла, механічних характеристик матеріалів та поверхонь контакту, особливостей контактної взаємодії в циклі контактування (в часі t). Дотичними зусиллями $q(x, f, \lambda, t)$ враховуємо сили

тертя між тілами, де f – коефіцієнт тертя між ними, $\lambda = x_0/a$ (рис. 1).

Як відомо [16], в механіці втомного руйнування матеріалів довговічність N пошкодженого тіла оцінюють за двома її компонентами: N_i – періодом (кількістю циклів навантаження) до зародження макротріщини l_0 та N_g – періодом зростання макротріщини від зародкової до критичної (допустимої) довжини l_c . Період N_g називають залишковою довговічністю. Розглянемо його.

Виходячи з аналізу експериментальних результатів, вважаємо, що в зоні контакту макротріщини (крайові та підповерхневі) спочатку розвиваються переважно прямолінійно за механізмом поперечного зсуву, а пізніше – криволінійно за механізмом розриву. Тому компоненту N_g подамо так:

$$N_g = N_g^\tau + N_g^\sigma, \quad (1)$$

де

$$N_g^\tau = \int_{l_{0\tau}}^{l_{c\tau}} v^{-1} (\Delta K_\tau(l), C_1^\tau, \dots, C_m^\tau) dl, \quad N_g^\sigma = \int_{l_{0\sigma}}^{l_{c\sigma}} v^{-1} (\Delta K_\sigma(l), C_1^\sigma, \dots, C_m^\sigma) dl. \quad (2)$$

Тут N_g^τ і N_g^σ – довговічності на стадії розвитку макротріщини відповідно за механізмом зсуву і розриву; $l_{0\tau}$, $l_{0\sigma}$, $l_{c\tau}$, $l_{c\sigma}$ – початкові і допустимі (критичні) довжини макротріщини відповідно на стадії зсуву і розриву; $v = dl/dN$ – швидкість росту тріщини, l – її біжуча довжина. Параметр напружено-деформованого стану $K(l, \lambda, t, \theta)$, який відповідає за руйнування у вершині тріщини, вибираємо відповідно до ймовірного механізму руйнування. Загалом залежності $v(\Delta K)$ установлюють експериментально у вигляді діаграм втомного руйнування (ДВР) [16]. На їх основі визначають також константи C_1, \dots, C_m – характеристики циклічної тріщиностійкості матеріалу.

Параметр $K(l, \lambda, t, \theta)$ у межах лінійної механіки руйнування знаходять через коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН) K_I і K_{II} зі співвідношень відповідного критерію локального руйнування:

$$K = K(l, \lambda, t, \theta^*) = \bar{K} [K_I(l, \lambda, t), K_{II}(l, \lambda, t), \theta^*(l, \lambda, t)]; \quad (3)$$

$$\theta^* = F(l, \lambda, t) = \bar{F} [K_I(l, \lambda, t), K_{II}(l, \lambda, t)];$$

тут θ – полярний кут, що відраховують від дотичної до тріщини у її вершині (рис. 1, точка A_j), а θ^* – кут, за якого для фіксованих l, λ, t параметр K досягає екстремального (максимального за модулем) значення. Оскільки впродовж циклу контактування напруження міняються в околі точки A_j , а отже, змінюються і величини $K(l, \lambda, t, \theta^*)$ і $\theta^*(l, \lambda, t)$, то вважаємо [10], що тріщина підростає в циклі лише в той момент (за тих значень $t = t^*$ і $\lambda = \lambda^*$), коли параметр $K(l, \lambda, t, \theta^*)$ досягає екстремуму і за кутом θ , і за аргументами t та λ . Тоді напрям росту тріщини в точці A_j визначатиме кут $\theta^{**} = \theta^*(l, \lambda^*, t^*)$. При цьому розмах параметра ΔK в циклі контактування має перевищувати розмах порога втомного росту тріщини в матеріалі ΔK_{th} , тобто повинні виконуватись умови

$$\max |K(l, \lambda, t, \theta^*)| = |K(l, \lambda^*, t^*, \theta^{**})|; \quad (4)$$

$$\Delta K = \max K(l, \lambda, t, \theta^{**}) - \min K(l, \lambda, t, \theta^{**}) \geq \Delta K_{th}. \quad (5)$$

На стадії зсувного росту макротріщини відповідальними за руйнування у її вершині вважаємо максимальні зсувні напруження. Тоді співвідношення (3) для відповідного критерію набувають вигляду [6]

$$K = K_{II\theta}(l, \lambda, t, \theta^*) = \frac{1}{2} \cos(\theta^*/2) [K_I(l, \lambda, t) \sin \theta^* + K_{II}(l, \lambda, t) (3 \cos \theta^* - 1)]; \quad (6)$$

$$2K_{II}(l, \lambda, t) \operatorname{tg}^3(\theta^*/2) - 2K_I(l, \lambda, t) \operatorname{tg}^2(\theta^*/2) - 7K_{II}(l, \lambda, t) \operatorname{tg}(\theta^*/2) + K_I(l, \lambda, t) = 0.$$

Умови ж росту тріщини (4) і (5) конкретизуємо у такі [8, 10]:

$$\max |K_{I0}(l, \lambda, t, \theta^*)| = |K_{I0}(l, \lambda^*, t^*, \theta^{**})|; \quad (7)$$

$$\max K_{I0}(l, \lambda, t, \theta^{**}) - \min K_{I0}(l, \lambda, t, \theta^{**}) \geq \Delta K_{Ith}, \quad (8)$$

де K_{Ith} – поріг втомного росту макротріщини за поперечного зсуву. Умова (8) за виконання в ній знаку рівності стає умовою переходу від стадії зародження макротріщини до стадії росту за зсувом і може служити [8] також для визначення початкової (зародкової) її довжини $l_{0\tau}$.

На другій стадії росту макротріщини за механізмом розриву відповідальними за руйнування є максимальні розтягальні колові напруження. Параметр $K(l, \lambda, t, \theta^*)$ тут описуємо, використовуючи співвідношення узагальненого критерію нормального розриву (σ_θ -критерію) [17], формулами

$$K = K_{I0}(l, \lambda, t, \theta^*) = \cos^3(\theta^*/2) \left[K_I(l, \lambda, t) - 3K_{II}(l, \lambda, t) \operatorname{tg}(\theta^*/2) \right]; \quad (9)$$

$$\theta^* = 2 \arctg \left(\left(K_I(l, \lambda, t) - \sqrt{K_I^2(l, \lambda, t) + 8K_{II}^2(l, \lambda, t)} \right) / (4K_{II}(l, \lambda, t)) \right).$$

Відповідно умови росту тріщини будуть:

$$\max K_{I0}(l, \lambda, t, \theta^*) = K_{I0}(l, \lambda^*, t^*, \theta^{**}); \quad (10)$$

$$\max K_{I0}(l, \lambda, t, \theta^{**}) - \min K_{I0}(l, \lambda, t, \theta^{**}) \geq \Delta K_{Ith}; \quad (11)$$

тут K_{Ith} – поріг втомного росту макротріщини розривом.

Умову (11) можна також вважати умовою переходу від стадії росту макротріщини за механізмом зсуву до стадії росту за розривом і, використовуючи її, коли виконується саме знак рівності, можна визначати [8] критичну довжину зсувної макротріщини $l_{c\tau}$. Загалом зсувна тріщина може рости і після виконання умови (11), яка тоді стає умовою галуження. Тут також приймаємо, що $l_{0\sigma} = l_{c\tau}$, а для обчислення критичної довжини $l_{c\sigma}$ використовуємо [8] умову

$$\Delta K_{I0} = \Delta K_{Ic}, \quad (12)$$

де ΔK_{Ic} – критичний розмах КІН K_I , після досягнення якого тріщина росте спонтанно.

Траєкторію росту макротріщини будемо покровоко згідно з алгоритмом, описаним раніше [8, 10, 11]. Для цього вводимо в розгляд два типи кроків: основний, пов'язаний з ростом тріщини, і допоміжний, пов'язаний зі зміною (розташуванням) навантаження в циклі контактування. Крок приросту траєкторії тріщини h на кожному етапі побудови траєкторії відкладаємо з вершини тріщини у напрямі, що визначає кут $\theta = \theta^{**}$ (рис. 1). Допоміжний крок $\Delta\lambda$ використовуємо для пошуку екстремумів і розмаху параметра K у циклі контактування. На кожному етапі побудови траєкторії величини λ^* , t^* , θ^{**} , ΔK вважаємо сталими, а КІН K_I і K_{II} знаходимо з розв'язку СІР статичної, у загальному випадку контактної, задачі теорії пружності для півплощини з криволінійною тріщиною кожного разу іншої конфігурації. Кожний (j -й) приріст траєкторії апроксимуємо поліномом третього степеня, коефіцієнти якого встановлюємо на основі критеріальних співвідношень росту тріщини та умов гладкості стикування сусідніх ділянок траєкторії. Рівняння контуру траєкторії є сплайном її приростів.

Залишкову довговічність визначаємо зі співвідношень (2):

$$N_g \approx \sum_{k=1}^{j_c} \Delta l_k v_k^{-1} [\Delta K(l), C_1, \dots, C_m]; \quad (13)$$

тут j_c – сумарна кількість етапів приросту тріщини до досягнення критичної довжини; Δl_k і v_k – відповідно приріст тріщини і швидкість просування її вершини на

k -му етапі. Будуючи траєкторії розвитку системи тріщин, тобто одночасно із декількох (M) вершин ($m = 1, 2, \dots, M$), довжини кроків h_m приростів тріщин співвідносимо [16] до швидкостей просування цих вершин: $h_m/h_1 = v_m/v_1$. Зауважимо, що перші варіанти описаної моделі запропоновано в працях [18, 19].

Контактна взаємодія кочення. Сформульовану вище модель застосовано для дослідження руйнування в тілах кочення, а також для оцінювання їх довговічності під час контактної втоми. Зокрема, праці [8, 13, 20, 21] присвячено моделі і оцінюванню контактної залишкової довговічності за критерієм утворення пітингу під час росту пітингоутворювальної тріщини спочатку за механізмом зсуву, а потім – розриву. В низці публікацій вперше на основі аналізу траєкторій розвитку тріщин на стадії їх розвитку за механізмом розриву досліджено особливості і причини формування таких типових контактних-втомних пошкоджень у тілах кочення, як пітинг [8, 12, 13, 18, 20–23], темна пляма [8, 12, 24, 25], відшарування [8, 26, 27], розкришування [8, 25, 28] залежно від експлуатаційних параметрів пари кочення та характеристик тріщиностійкості матеріалів. Нижче стисло наведено отримані результати та висновки.

Розглянемо, наприклад, однонаправлене кочення з проковзуванням. Тіло кочення, пошкоджене тріщинами, моделюємо пружною півплощиною, послабленою розрізами (рис. 1). Контактний вплив з боку контртіла – повторним поступальним переміщенням вздовж краю півплощини герцівських нормальних зусиль з дотичною компонентою (рис. 2), яка відображає сили тертя ковзання. Пошкоджене тіло є ведене. Відповідні крайові умови на краю півплощини ($y = 0$) мають вигляд

$$\begin{aligned} \sigma_y - i\tau_{xy} &= -p(x) - iq(x) = -p_0(1 + if)\sqrt{a^2 - (x - x_0)^2}/a, & |x - x_0| \leq a, \\ \sigma_y - i\tau_{xy} &= 0, & |x - x_0| > a; \end{aligned} \quad (14)$$

тут $2a$ – довжина ділянки контакту, а p_0 – максимальний тиск у її центрі, $\lambda = x_0/a$.

Кочення за умов граничного змащування. Утворення пітингу. Пітинг виникає практично на поверхні всіх пар кочення. В інженерній практиці за глибиною ямок викришування і кількістю циклів до їх виникнення визначають відповідно глибину і періодичність гріндингу (обточування) поверхні рейок, а також їх контактну довговічність. Ще в 1935 р. С. Уей [29] висловив припущення, що пітинг виникає тільки за наявності мастила в контакті між тілами кочення. Тому розглянемо ріст крайових тріщин у тілах кочення за умов граничного змащування. Вважаємо, що товщина прошарку мастила нульова, але воно суттєво зменшує тертя між тілами і є нестисливою рідиною. Також припускаємо, що пошкоджене тріщинами тіло кочення є ведене. Власне в такому тілі зсувні крайові тріщини зорієнтовані в напрямі руху контртіла (контактного навантаження), що сприяє проникненню в тріщини мастила під час кочення. При цьому мастило зменшує тертя між бере-

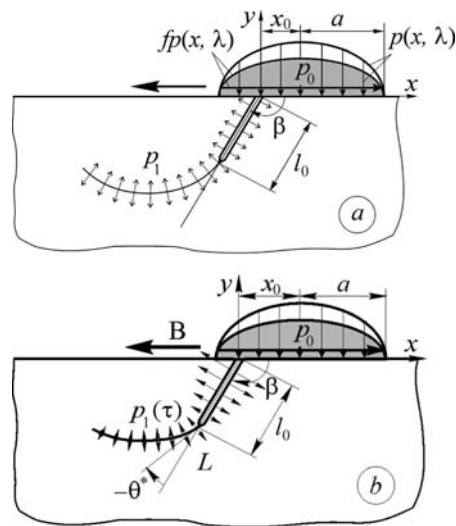


Рис. 2. Розрахункові схеми;
B – напрям руху контртіла; $\tau \in L$.

Fig. 2. Computational schemes;
B – load movement direction; $\tau \in L$.

гами тріщин на стадії зсуву. А згодом під час кочення воно може розділити береги тріщин і розклинювати їх. Тоді відбувається перехід від руйнування за механізмом зсуву до руйнування за механізмом розриву. Розклинювальну дію мастила (або іншої рідини) на береги тріщини моделюємо рівномірно [8, 12, 20, 22] або лінійно [13, 21] розподіленим нормальним тиском по всій довжині тріщини (рис. 2).

У працях [8, 12, 13, 21, 22] побудовано траєкторії розвитку початково прямолінійної крайової тріщини на стадії її розвитку за механізмом розриву (за σ_0 -критерієм) залежно від параметра r ($0 < r \leq 1,0$; $p_1(0) = rp(\lambda) = rp_0 \sqrt{1 - \lambda^2}$) [8, 13, 21, 22], що характеризує інтенсивність тиску мастила на береги тріщини, від тертя між тілами кочення ($f = 0,05 \div 0,15$), відносної довжини початкової тріщини $\varepsilon = l_0/a$ та її кута нахилу (β) до краю. Отримані результати свідчать про те, що крайові, нахилені під малими кутами до поверхні (в напрямку руху контртіла), тріщини під дією на їхніх берегах тиску (мастила) розвиваються до поверхні і призводять до її викришування (рис. 3), тобто до утворення пітингу. Вперше (1991 р.) цей результат встановлено в праці [23]. Зростання тиску (збільшення параметра r) суттєво пришвидшує вихід тріщини на поверхню (траєкторії стають крутішими). За лінійного розподілу тиску вздовж тріщини КІН вздовж траєкторій є суттєво менші, ніж за рівномірного. Загалом форма розрахованих траєкторій близька до форми реальних ямок викришування, що теоретично підтверджує гіпотезу Уея, що головною причиною утворення пітингу є тиск мастила на береги тріщини.

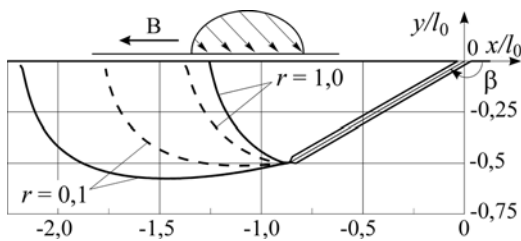


Рис. 3. Траєкторії розвитку крайової тріщини залежно від тиску мастила на її береги: суцільні криві – лінійно розподілений тиск; штрихові – рівномірний.

Fig. 3. Edge crack growth paths depending on the lubricant pressure on crack faces: solid curves – linearly distributed pressure; dashed curves – uniform pressure.

структурою пластинчастого перліту: на поперечний зсув – за ДВР для сталі RSB12 [30], а на розрив – за діаграмою для сталі 75ХГСТ [16]. Обидві діаграми описуємо формулою Яреми–Микитишина [16], в результаті чого встановлюємо значення характеристик циклічної тріщиностійкості цих сталей [13, 21].

Для розрахунків приймали, що півдовжина ділянки контакту $a = 7$ mm, $f = 0,1$, $\beta = 5\pi/6$, $r = 0,1$, коефіцієнт тертя між берегами тріщини під час зсуву $f_c = 0,1$. У табл. 1 подано результати розрахунків довговічності для діапазону експлуатаційних значень тиску p_0 в системі колесо–рейка.

На рис. 4 побудовано криві контактної втоми для обох розподілів тиску рідини на берегах тріщини. Порівнюючи їх, можна зробити висновок, що у діапазоні значень $p_0 = 800 \div 1500$ МПа за рівномірного розподілу тиску рідини на берегах тріщини довговічність зменшується, порівняно з лінійним розподілом, у середньому на 45% за однакових значень інших параметрів. Також на цьому рисунку нанесено експериментальні дані [31, 32], які задовільно корелюють з нашими результатами (якщо прийняти, що період зародження крайових тріщин у тілах

Використовуючи описану вище розрахункову модель, оцінили [13, 21] залишкову довговічність рейкової сталі за розвитком пітингу під час кочення зі змашуванням. Зупинимось на цій процедурі і результатах детальніше. Тобто встановимо кількість циклів кочення, впродовж яких крайова зародкова макротріщина виросте від довжини $l_{0\tau}$ до критичної $l_{c\sigma}$. Довжини $l_{0\tau}$, $l_{c\sigma} = l_{0\sigma}$ знаходимо на основі рівностей (8) і (11), покладаючи в них $K_{th} = K_{v_{th}}$, де $v_{th} = 10^{-10}$ m/cycle, а $l_{c\sigma}$ – з рівності (12). Розрахунки виконуємо для рейкової сталі зі

кочення зі змащуванням на один–два порядки нижчий, ніж період їх росту до поверхні кочення).

Таблиця 1. Залежність залишкової довговічності N_g від максимального значення p_0 контактної тиску за лінійного розподілу тиску мастила p_1 в тріщині

p_0 , MPa	$l_{0\tau}$	$l_{0\sigma}$	$l_{c\sigma}$	$N_g^\tau \cdot 10^{-6}$	$N_g^\sigma \cdot 10^{-6}$	$N_g \cdot 10^{-6}$
	mm					
700	2,33	8,71	13,31	1,640	1,536	3,176
900	1,51	6,02	9,66	0,927	1,477	2,405
1100	0,97	4,49	7,30	0,863	1,305	2,168
1300	0,72	3,58	6,19	0,529	1,119	1,648
1500	0,57	3,01	5,06	0,362	0,988	1,350
1700	0,48	2,62	4,58	0,272	0,882	1,154

Додамо, що за довжинами макротріщини $l_{0\tau}$, $l_{c\tau} = l_{0\sigma}$, $l_{c\sigma}$ (табл. 1) та кутом β легко оцінити розміри частинок викришування. Бачимо також, що чим більше контактне навантаження (більше p_0), то швидше виникає пітинг (менша довговічність) і дрібніші частинки викришування.

Кочення за умов сухого тертя або зволоження. Формування дефектів темна пляма, розкришування, відшарування. Останнім часом увагу інженерів та дослідників привертає небезпечний приповерхневий дефект у залізничних рейках, який називають *темна пляма* [33]. Він характеризується двома тріщинами, які починаються майже від одного і того ж місця на біговій доріжці рейки і ростуть у протилежних напрямках у приповерхневій зоні. Одна з цих тріщин, головна, поширюється під пологим кутом до поверхні кочення в напрямку руху контртіла (колеса), а інша росте повільніше і під меншим кутом у протилежному напрямку. Від цих тріщин утворюються відгалуження вгору до поверхні і вниз у глибину матеріалу, через що поверхня рейки на цій ділянці темнішає й осідає. Крім того, часто одна з нижніх гілок від головної тріщини може пройти наскрізь через рейку і спричинити її повне зруйнування. У зв'язку з цим підраховано КІН і побудовано траєкторії (за σ_0 -критерієм) розвитку однієї нахиленої крайової [12, 24] і розгалуженої (у загальному випадку триланкової) [25] тріщин залежно від їх початкової геометрії для різних коефіцієнтів тертя f (0,1–0,4) у контакті між тілами кочення. Зволоження враховували, зменшуючи коефіцієнт тертя f . Результати досліджень і, зокрема, траєкторії

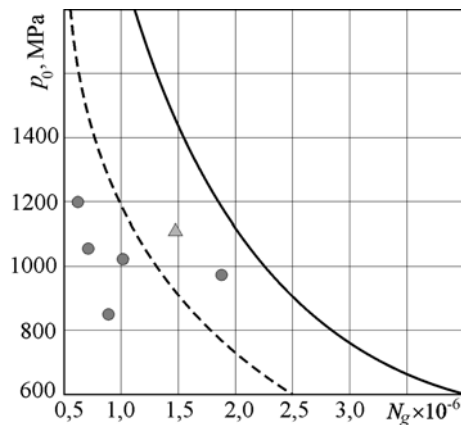


Рис. 4. Криві контактної втоми для різних розподілів тиску змащувальної рідини в тріщині: суцільна крива – лінійно розподілений тиск; штрихова – рівномірний; \blacktriangle – експериментальні дані Донзелли та ін. [31], \bullet – Клейтона та Су [32].

Fig. 4. Contact fatigue curves for different distribution of lubricating liquid in a crack: solid curve – linearly distributed pressure; dashed curve – uniform pressure; \blacktriangle – G. Donzella et al. [31] experimental data; \bullet – P. Clayton, X. Su [32] data.

свідчать, що на їх форму суттєво впливає коефіцієнт тертя в контактi. Для малих коефіцієнтів тертя ($f \approx 0,1$) лiва головна гiлка дефекту росте паралельно поверхнi кочення у напрямi перемiщення контртіла (колеса), а на правій головній гiлці можуть появлятися відгалуження до поверхнi тіла. Для великих коефіцієнтів тертя ($f \approx 0,3$) від обох головних гiлок дефекту розвиваються відгалуження в глибину матеріалу (рейки). Таким чином, зміна коефіцієнта тертя в контактi між тілами веде до галуження крайових приповерхневих тріщин. Отримані результати узгоджуються зі спостереженнями експериментаторів про те, що поява темної плями пов'язана зі зміною погодних умов (суха–волога погода), котрі суттєво і часто змінюють тертя між колесами і рейкою. Також показано, що головною причиною росту магістральної наскрізної тріщини може бути велике тертя в контактi ($f > 0,15$). Подібних теоретичних розрахунків на сьогодні в літературі немає.

Природно, що в реальних експлуатаційних умовах на поверхнi кочення виникає не одна, а система тріщин. Зокрема, в рейках – система паралельних поверхневих тріщин (checks), яка під час еволюції може спричинити **розкришування** поверхнi контакту. В праці [25] обчислено КІН і побудовано траєкторії розвитку системи двох, трьох, п'яти крайових початково паралельних тріщин. Вважали, що тріщини ростуть за механізмом розриву, а в контактi між тілами кочення виконуються умови сухого тертя або граничного змащування без розклинювання тріщин ($f = 0,05 \div 0,4$). Показано, що за малих коефіцієнтів тертя ($f = 0,1; 0,05$; зволоження, граничне змащування) тріщини розвиваються переважно паралельно поверхнi тіла в напрямi перемiщення контртіла, перетинаючи одна одну і створюючи небезпеку розкришування приповерхневого шару зони контакту. За великого тертя між тілами кочення ($f \geq 0,3$) вони ростуть у глибину матеріалу.

Відшарування поверхнi в тілах кочення, як і пітинг, – одне з найпоширеніших пошкоджень пар кочення, в тому числі рейок. У працях [26, 27] обчислено КІН і траєкторії розвитку початково прямолінійної горизонтальної тріщини в циклічно навантаженій півплощині за умов, що в контактi між тілами реалізуються умови сухого тертя ($f = 0,2 \div 0,4$). Розрахунки виконано для досить великих діапазонів параметрів, які характеризують початкову довжину і розташування тріщини. Обчислення для відносно малих початкових довжин тріщини ($\varepsilon = l_0/a \leq 2,0$, $2l_0$ – довжина початкової тріщини) свідчать, що горизонтальна тріщина з правої (“+”) вершини росте вглиб матеріалу, а з лівої (“-”) – до поверхнi, якщо контртіло переміщається по поверхнi справа наліво. Для більших довжин ($\varepsilon > 2,0$) тріщина розвивається з обох вершин до краю тіла практично перпендикулярно до поверхнi. Виявлено, що горизонтальній тріщині важко вийти на поверхню за механізмом нормального розриву: максимальні значення КІН $K_{I0}^{\pm}(l_0)$ є малі (переважно менші від порогових значень циклічної тріщиностійкості, наприклад, рейкових або валкових сталей). Це, очевидно, і є причиною досить довгих відшарувань на рейках та валках, які реалізуються переважно поширенням підповерхневих тріщин за механізмом поперечного зсуву.

Контактна взаємодія фретинг-втоми. Наведену вище модель розвинуто для контактної взаємодії фретинг-втоми [8, 14, 15] (рис. 5a). Нижче подано основні елементи цієї моделі та її застосування, коли між елементами фретинг-пари реалізуються умови проковзування/зчеплення.

Отже, те із контактуючих тіл, що пошкоджене тріщинами, моделюємо пружною півплощиною з тріщинами (див. рис. 1). Дію контртіла – розподіленими на ділянці контакту зусиллями. Як нормальний складник контактного навантаження $p(x, \lambda, t) = p(x, \lambda)$ використовуємо сталій [14, 15, 34] або герцівський тиск [35].

Враховуючи знакозмінний характер переміщень контртіла, модельні дотичні зусилля запишемо так:

$$q(x, f, \lambda, t) = q^\pm(x, f, \lambda) = \pm q(x, f, \lambda). \quad (15)$$

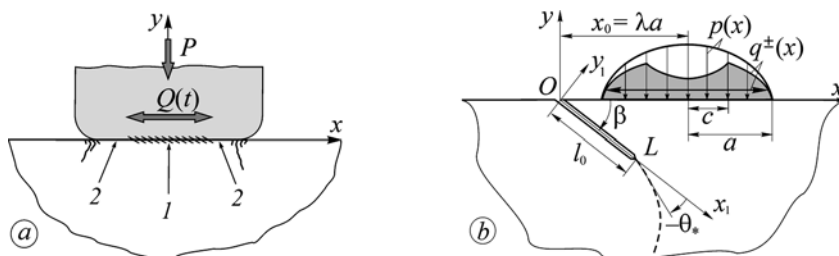


Рис. 5. Схема реалізації фретинг-втоми (а) (1 – ділянка зчеплення, 2 – ділянки проковзування) та розрахункова схема задачі (б).

Fig. 5. Scheme of realization of fretting fatigue (а) (1 – stick zone; 2 – slip zones) and computational scheme of the problem (б).

Параметр λ (рис. 5а) вважатимемо фіксованим. Тоді для побудови траєкторій росту тріщин за умов фретинг-втоми використовуватимемо лише основний крок h (див. рис. 1) приросту траєкторії. Однаково розподілені і протилежні за напрямом дотичні зусилля $q^+(x, f, \lambda)$ і $q^-(x, f, \lambda)$ формують цикл контактування і відповідають його додатній та від'ємній фазам. Під час фретинг-втоми між тілами можливе як повне проковзування, так і зчеплення з частковим проковзуванням. Вважаємо, що за повного проковзування дотичні зусилля

$$q^\pm(x, f, \lambda) = \pm fp(x, f, \lambda). \quad (16)$$

За таких умов побудуємо траєкторії поширення крайових тріщин за реалізації механізму розриву. Отже, вважаємо, що траєкторія формується максимальними значеннями КІН K_{I0} у циклі контакту, які з урахуванням вищесказаного запишемо так:

$$K_{I0}^{\max}(l) = \max \{ K_{I0}^+(l), K_{I0}^-(l) \}. \quad (17)$$

Відповідно умову росту тріщини (11) подамо у вигляді

$$\Delta K_{I0}(l, \theta) = \left| K_{I0}^+(l, \theta^{**}) - K_{I0}^-(l, \theta^{**}) \right| \geq \Delta K_{I0h}, \quad \theta^{**} = \begin{cases} \theta^{*+}, & \text{якщо } K_{I0}^+ > K_{I0}^-; \\ \theta^{*-}, & \text{якщо } K_{I0}^- > K_{I0}^+. \end{cases} \quad (18)$$

Експериментальні дані та інженерна практика свідчать, що під час контактної взаємодії фретинг-втоми тріщини локалізуються переважно обабіч межі ділянки контакту (рис. 5а). Вони утворюються і розвиваються під дією циклічних контактних та можливих об'ємних (розтяг–стиск, згин) зусиль і найчастіше ростуть у глибину матеріалу, нерідко стаючи руйнівними. Такі теоретичні дослідження описано в працях [8, 14, 35].

Проте тріщини, що появились під контргілом, можуть заповнюватись порошкоподібними продуктами фретингу. Через їх розклинювальну дію тріщини повертають до поверхні тіла і спричиняють її викришування [8, 15, 34].

Проковзування/зчеплення між контактуючими тілами. Для моделювання дії контргіла, коли в зоні контакту елементів фретинг-пари є ділянка зчеплення, використовуємо розподіл контактного тиску, встановлений незалежно К. Каттанео і Р. Міндліном [36]. Тоді нормальна компонента контактного тиску має еліптичний розподіл, а дотична – дещо складніша (рис. 5б):

$$p(x) = (p_0/a) \sqrt{a^2 - (x - x_0)^2}, \quad |x - x_0| \leq a, \quad y = 0; \quad (19)$$

$$q^{\pm}(x) = \begin{cases} \pm f p(x), & -a \leq x - x_0 \leq -c, \quad c \leq x - x_0 \leq a; \\ \pm f(p_0/a) \left[\sqrt{a^2 - (x - x_0)^2} - \sqrt{c^2 - (x - x_0)^2} \right], & |x - x_0| \leq c, \quad y = 0, \end{cases} \quad (20)$$

де відносно довжину ділянки зчеплення визначає відношення $c/a = \sqrt{1 - |Q/fP|}$; Q і P – відповідно дотична і нормальна компоненти вектора зовнішнього навантаження. Вважаємо, що тріщина є поза ділянкою контакту ($|\lambda| \geq 1$) і її береги незавантажені.

Обчислюємо КІН для початково прямолінійної крайової тріщини. За результатами таких розрахунків встановлено, що зі збільшенням розміру ділянки зчеплення КІН суттєво зменшуються (табл. 2). Аналіз траєкторій розвитку тріщини, гирло якої розташоване поза ділянкою контакту, показав, що:

– зі збільшенням довжини ділянки зчеплення траєкторія відхиляється від зони контакту (рис. 6а), подібно, як зі зменшенням коефіцієнта тертя f , коли ділянка зчеплення відсутня;

– траєкторії розвитку тріщини мало залежать від кута β її нахилу до краю півплощини та від віддалі гирла тріщини до межі контактної навантаження (рис. 6б) і мають асимптоти, які формулює коефіцієнт тертя f .

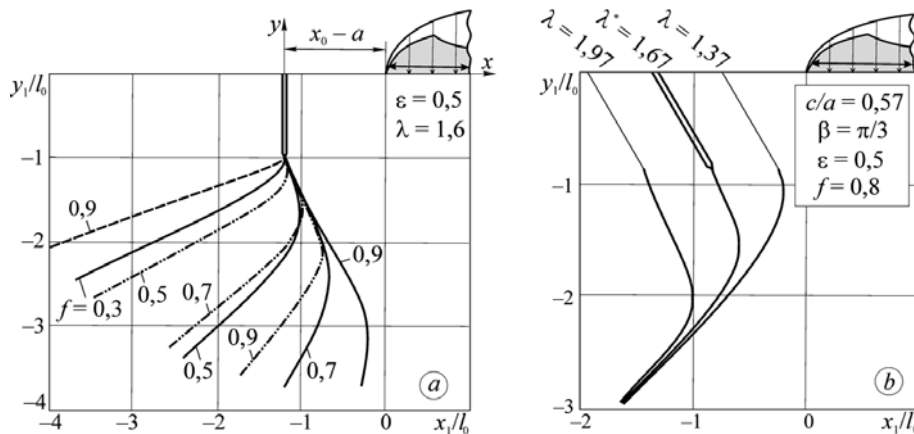


Рис. 6. Траєкторії розвитку тріщини: а – залежно від коефіцієнта тертя f і довжини ділянки зчеплення (штрихова лінія – $c/a = 0,85$; штрих-пунктирна – $0,57$; суцільна – 0); б – залежно від віддалі гирла тріщини до краю контактної навантаження.

Fig. 6. Crack growth paths: a – depending on the friction coefficient, f , and the length of the stick region (dashed line – $c/a = 0.85$; dashed-dotted – 0.57 ; solid line – 0); b – depending on the distance from the crack mouth to the boundary of the contact loading zone.

Перший із висновків і результати в табл. 2 добре корелюють із двома головними відомими підходами до конструктивного і технологічного підвищення фретинг-втомної міцності, а саме: підвищити міцність можна, усуваючи зону проковзування однієї поверхні по іншій, або ж, навпаки, полегшуючи проковзування настільки, аби воно відбувалось з найменшим тертям.

Таблиця 2. Залежність безрозмірних КІН $F = K/(p_0 \sqrt{\pi a})$ від довжини ділянки зчеплення ($f = 0,8$; $\beta = \pi/3$; $\varepsilon = l_0/a = 0,1$; $\lambda = x_0/a \approx 1,1$)

c/a (Q/fP)	F_I	F_{II}	F_{I0}
0,85 (0,27)	0,071	0,007	0,072
0,57 (0,67)	0,202	0,036	0,211
0 (1,00)	0,285	0,059	0,302

РЕЗЮМЕ. Представлена расчетная модель для исследования процессов разрушения и оценки остаточной долговечности твердых тел при их циклическом контактном взаимодействии. Основой модели являются алгоритмы пошагового построения криволинейных траекторий развития трещин. Модель реализована для контактных взаимодействий качения и фреттинг-усталости. Изучены особенности и причины формирования таких типичных контактно-усталостных повреждений, как питтинг, отслаивание, темное пятно, системное раскрашивание в зависимости от эксплуатационных параметров трибосоединения и характеристик циклической трещиностойкости материалов на разрыв и поперечный сдвиг. Проанализированы результаты, полученные в этом направлении за последнее десятилетие.

SUMMARY. The calculational model for investigation of fracture processes and residual life estimation of solids under cyclic contact interaction has been presented. The basis of the model are algorithms of step-by-step construction of crack propagation paths. The model is realized for contact interactions of rolling and fretting fatigue. Peculiarities and causes of formation of such typical contact fatigue damages as pitting, spalling, dark-spot, cracking have been investigated depending on operational parameters of a tribojoint and fatigue crack growth resistance characteristics of material. Synthesis of the received results on this problem for the last decade has been made.

1. Lawn B. R. and Wilshaw T. R. Indentation fracture: principles and application // J. Mater. Sci. – 1975. – **10**, № 6. – P. 1049–1081.
2. Rooke D. P. and Jones D. A. Stress intensity factors in fretting fatigue // J. Strain Anal. – 1979. – **14**, № 1. – P. 1–6.
3. Трощенко В. Т., Цыбанев Г. В., Хоцяновский А. О. Долговечность сталей при фреттинг-усталости // Проблемы прочности. – 1988. – № 6. – С. 3–8.
4. Hills D. A. and Nowell D. Mechanics of fretting fatigue. – Dordrecht: Kluwer Academ. Publ., 1994. – 236 p.
5. Keer L. M. and Bryant M. D. A pitting model for rolling contact fatigue // Trans. ASME: J. Lubric. Technol. – 1983. – **105**, № 2. – P. 198–205.
6. Kaneta M., Yatsuzuka H., and Murakami Y. Mechanism of crack growth in lubricated rolling/sliding contact // ASLE Trans. – 1985. – **28**, № 3. – P. 407–414.
7. Bower A. F. The influence of crack face friction and trapped fluid on surface initiated rolling contact fatigue cracks // J. Tribol., Trans. ASME. – 1988. – **110**, № 4. – P. 704–711.
8. Дациськин О. П. Долговічність і руйнування твердих тіл при їх циклічній контактній взаємодії // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2005. – **41**, № 6. – С. 5–25.
(Datsyshyn O. P. Service Life and Fracture of Solid Bodies under the Conditions of Cyclic Contact Interaction // Materials Science. – 2005. – **41**, № 6. – P. 709–733.)
9. Саверук М. П. Двумерные задачи упругости для тел с трещинами. – К.: Наук. думка, 1981. – 324 с.
10. Дациськин О. П., Марченко Г. П., Панасюк В. В. До теорії розвитку тріщин при коченні // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1993. – **29**, № 4. – С. 49–61.
(Datsishin O. P., Marchenko G. P., and Panasyuk V. V., Theory of Crack Growth in Rolling Contact // Materials Science. – 1993. – **29**, № 4. – P. 373–383.)
11. Panasyuk V. V. and Datsyshyn O. P., and Marchenko H. P. To crack propagation theory under rolling contact // Eng. Fract. Mech. – 1995. – **52**, № 1. – P. 179–191.
12. Datsyshyn O. P. and Panasyuk V. V. Pitting of the rolling bodies contact surface // Wear. – 2001. – **251**. – P. 1347–1355.
13. Datsyshyn O. P., Panasyuk V. V., and Glazov A. Yu. Modelling of fatigue contact damages formation in rolling bodies and assesment of their durability // Ibit. – 2011. – **271**, Is. 1–2. – P. 186–194.
14. Панасюк В. В., Дациськин О. П., Щур Р. Б. Залишкова довговічність твердих тіл, що контактують в умовах фреттинг-втоми // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2000. – **36**, № 2. – С. 5–19.
(Panasyuk V. V., Datsyshyn O. P., Shchur R. B. Residual Life of Contacting Solid Bodies under the Conditions of Fretting Fatigue // Materials Science. – 2000. – **36**, № 2. – P. 153–169.)
15. Datsyshyn O. P. and Kadyra V. M. A fracture mechanics approach to prediction of pitting under fretting fatigue conditions // Int. J. Fatigue. – 2006. – **28**, № 4. – P. 375–385.
16. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин и др. // Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. – К.: Наук. думка, 1990. – **4**. – 679 с.

17. Панасюк В. В., Бережницький Л. Т. Определение предельных усилий при растяжении пластины с дугообразной трещиной // Вопросы механики реального твердого тела. Отв. ред. Г. В. Карпенко. – К.: Наук. думка, 1964. – С. 3–19.
18. Panasyuk V. V. and Datsyshyn O. P. Computational model fatigue fracture of solids under their contact interaction // Contact Mechanics II. Computational Techniques / Eds. M. H. Aliabadi, C. Alessandri. – Southampton, Boston: Computational Mechanics Publications, 1995. – P. 385–392.
19. Datsyshyn O. P. and Panasyuk V. V. Durability and fracture calculational model of solids under their contact interaction // ECF-11. Mechanism and mechanics of damage and failure / Ed. J. Petit, EMAS LTD, Warley, UK. – 1996. – Vol. II. – P. 1381–1386.
20. Прогноз контактної довговічності опорних валків вальцювальних станів за розвитком пітингу / О. П. Дацишин, В. І. Ткачов, А. Ю. Глазов, Р. А. Хруник // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – 42, № 6. – С. 95–105.
(Datsyshyn O. P., Tkachov V. I., Glazov A. Yu., Hrunyk R. A. Prediction of the Contact Durability of Back-up Rolls of Forge-Rolling Mills in the Process of Development of Pitting // Materials Science. – 2006. – 42, № 6. – P. 823–836.)
21. Панасюк В. В., Дацишин О. П., Глазов А. Ю. Прогноз контактної тривкості рейок за розвитком пітингу // Машинознавство. – 2007. – № 3. – С. 3–10.
22. Траєкторії розвитку крайових тріщин в тілах кочення за умов граничного змащування / О. П. Дацишин, В. В. Панасюк, Р. Є. Пришляк, А. Б. Терлецький // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2001. – 37, № 3. – С. 5–12.
(Datsyshyn O. P., Panasyuk V. V., Pryshlyak R. Ye., Terlets'kyi A. B. Path of Edge Cracks in Rolling Bodies under Conditions of Boundary Lubrication // Materials Science. – 2001. – 37, № 3. – P. 363–373.)
23. Дацишин О. П., Марченко Г. П. Про розвиток крайових тріщин // Там же. – 1991. – № 5. – С. 42–48.
24. Панасюк В. В., Дацишин О. П., Марченко Г. П. Про ріст тріщин в тілах кочення за умов сухого тертя та зволоження // Там же. – 2001. – 37, № 1. – С. 7–16.
(Panasyuk V. V., Datsyshyn O. P., Marchenko H. P. Crack Growth in Rolling Bodies under the Conditions of Dry Friction and Wetting // Materials Science. – 2001. – 37, № 1. – P. 1–11.)
25. Panasyuk V. V., Datsyshyn O. P., Levus A. B. Evolution of a system of edge cracks in the region of rolling bodies cyclic contact // ECF-14, Fracture Mechanics. Beyond 2000 / Eds. A. Neimitz and al. – Sheffield, UK: EMAS Publishing, 2002. – v. I/III. – P. 609–616.
26. Дацишин О. П., Копилець М. М. Прогноз довговічності тіл кочення за розвитком підповерхневої тріщини // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2003. – 39, № 6. – С. 12–23.
(Datsyshyn O. P., Kopylec M. M. Prediction of the Service Life of Rolling Bodies According to the Propagation of Subsurface Crack // Materials Science. – 2003. – 39, № 6. – P. 765–779.)
27. Дацишин О. П., Копилець М. М. Про відшарування поверхні кочення // Машинознавство. – 2003. – № 10. – С. 15–18.
28. Дацишин О. П., Левус А. Б. Коефіцієнти інтенсивності напружень для системи крайових тріщин у півплощині під дією герцівського тиску на її границі // Там же. – 2000. – № 11. – С. 9–15.
29. Way S. Pitting due to rolling contact // J. Appl. Mech. – 1935. – 2. – P. A49–A58.
30. Bold P. E., Brown M. W., and Allen R. J. Shear mode crack growth and rolling contact fatigue // Wear. – 1991. – 144, № 2. – P. 307–317.
31. The competitive role of wear and RCF in a rail steel / G. Donzella, M. Faccoli, A. Ghidini, A. Mazzu, and R. Roberti // EFM. – 2005. – 72. – P. 287–308.
32. Clayton P. and Su X. Surface initiated fatigue of pearlitic and bainitic steels under water lubricated rolling/sliding contact // Wear. – 1996. – 200. – P. 63–73.
33. Zerbst U., Madler K., and Hintze H. Fracture mechanics in railway applications – an overview // Eng. Fract. Mech. – 2005. – 72, Is. 2. – P. 163–194.
34. Пітингоутворення за фретинг-втоми / О. П. Дацишин, О. С. Калахан, В. М. Кадира, Р. Б. Щур // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – 40, № 2. – С. 7–18.
(Datsyshyn O. P., Kalahan O. S., Kadyra V. M., Shchur R. B. Pitting under the Conditions of Fretting Fatigue // Materials Science. – 2004. – 40, № 2. – P. 159–172.)
35. Дацишин О. П., Кадира В. М. Розвиток крайових тріщин під час фретинг-втоми за умов зчеплення/проковзування в контактні між тілами // Машинознавство. – 2006. – № 3. – С. 9–15.
36. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1986. – 510 с.

Одержано 22.10.2010