

УДК 539.375:620.178

МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ КОНТАКТНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ТРИБОЗ'ЄДНАНЬ (Огляд)

О. П. ДАЦИШИН, В. В. ПАНАСЮК

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

Наведено огляд літератури, присвяченої моделям та методикам оцінювання контактної довговічності елементів трибоз'єднань (пар кочення та фретинг-пар). Проаналізовано результати досліджень у тих наукових напрямках, на яких ґрунтуються ці методи, зокрема, у галузі механіки втомного руйнування циклічно контактуючих тіл і контактних задач математичної теорії тріщин. Розглянуто питання застосування нових підходів і результатів досліджень з контактної втоми кочення та фретинг-втоми до прогнозування контактної довговічності елементів трибоз'єднань.

Ключові слова: *втомне руйнування, траєкторії поширення тріщин, коефіцієнти інтенсивності напружень, циклічна тріщиностійкість, контактна втома кочення, фретинг-втома, контактної втоми пошкодження, довговічність.*

Елементи рухомих і нерухомих з'єднань машин і конструкцій піддаються циклічному контактуванню або через своє функціональне призначення, або під дією експлуатаційних чинників (наприклад, вібрацій). Пошкодження поверхонь контакту або й зруйнування елементів з'єднань під час такого контактування призводить до зниження або втрати робоздатності всієї машини чи конструкції. Забезпечення контактної міцності, довговічності та зносостійкості елементів механічних систем – одна з важливих сучасних науково-технічних проблем. Тут особливо актуально вивчити природу і причини типових пошкоджень трибоз'єднань і теоретично описати процеси їх утворення.

Одним із найпоширеніших видів механічного пошкодження твердих тіл у зоні їх циклічного контакту є тріщиноутворення. Тріщини, які з'являються в поверхневих шарах зон співдотику контактуючих тіл, можуть, поширюючись, формувати ямки (pitting), каверни (cavity), відшарування (spalling), розкришування (cracking) поверхні тощо, тобто спричинити різноманітні контактні пошкодження, зношування та втрату експлуатаційної здатності поверхонь контакту. Нерідко приповерхневі тріщини ініціюють поширення магістральної і повне руйнування виробу (деталі). За циклічного контактування деформівних тіл зародження і розвиток тріщин у зоні їх контакту найчастіше спостерігаються, коли контактна взаємодія реалізується як фретинг-втома, кочення, пульсівний контакт, фрикційна втома тощо.

Контактна втома кочення характерна для таких трибосистем (трибоспрямижень), як колесо-рейка, опорний і робочий валки вальцювальних станів, різноманітні зубчасті зачеплення, кулькові та роликів підшипники тощо.

Фретинг-втома реалізується у вузлах машин та конструкцій, поверхні елементів яких зазнають незначних коливних взаємних проковзувань, викликаних здебільшого циклічними навантаженнями або 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. Відомо, що тріщини, які виникають у зоні контакту елементів вузлів і з'єднань, підданих фретинг-втомі, можуть у декілька разів знижувати їх втомну довговічність, тобто дуже небезпечні.

Фрикційною втомою називають процес руйнування поверхні тертя, який протікає в таких спряженнях, як підшипники ковзання, фрикційні муфти, елементи гальм (колодки і диски) тощо.

Усі згадані контактні взаємодії спричиняють контактну втому матеріалу, тобто підготовку та розвиток руйнування поверхневих шарів матеріалу деталей, на поверхні яких діють змінні контактні навантаження. Забезпечення контактної міцності і довговічності різноманітних механічних систем – актуальна науково-технічна проблема, над розв'язанням якої працюють науковці та інженери і в Україні, і за її межами.

Нижче зроблено огляд літератури про моделі та методики оцінювання контактної довговічності елементів пар кочення та фретинг-пар. Проаналізовано результати досліджень у тих наукових напрямках, на яких ґрунтуються запропоновані методики, зокрема, у галузі механіки втомного руйнування циклічно контактних тіл і контактних задач математичної теорії тріщин.

Механіка втомного руйнування. Явище руйнування матеріалів після певної кількості повторних навантажень, що суттєво менші, ніж одноразове руйнівне, вперше назвав втомою матеріалу вчений-механік Ж. Б. Понселе у книзі “Вступ до промислової механіки” (1837–1839 рр.) [1]. Це, зокрема, стосувалося падіння довговічності сталевих деталей під повторно-змінними навантаженнями. Саме в той час почався бурхливий розвиток залізничного транспорту, який часто супроводжувався поломками рейок, коліс, осей під дією змінних навантажень. Тому дослідження втомлюваності металів (тоді вуглецевих сталей) упродовж майже усього 19-го століття зосереджувалися на потребах залізниці [1]. На переломі 19 і 20-го століть домінуючу роль у їх стимулюванні починає відігравати автомобілебудування, а з 20-х років 20-го століття – літакобудівна промисловість. Тогочасні підходи в науці про міцність, втому і руйнування матеріалів тепер називають [2] класичними, де вважають, що елемент деформованого твердого тіла, підданого навантаженню, може знаходитися або в суцільному, або в зруйнованому стані. Перехід матеріалу (тіла) зі суцільного до зруйнованого стану – процес руйнування – відбувається раптово, коли характеристики напружено-деформованого стану досягають деяких критичних значень, притаманних цьому матеріалу. Якщо вони не досягають їх, то руйнування не відбувається і тіло зберігає свою цілісність – міцність. Класичні погляди на руйнування призвели до установлення відповідних характеристик міцності конструкційних матеріалів та методів їх визначення, які стали основою відомих феноменологічних гіпотез міцності [3]. Однак вони не розкривають самого механізму руйнування, не виявляють чинників, які пришвидшують або сповільнюють цей процес, не дають можливості підійти до формування принципів керування механічними характеристиками матеріалу, зокрема його опором руйнуванню.

Основна ідея неklasичних (сучасних) підходів полягає у введенні в розгляд деякого проміжкового стану матеріалу (між суцільним і зруйнованим) [2], який необхідно враховувати під час визначення його міцності та довговічності, особливо, якщо в ньому є дефекти типу тріщин. Важливою особливістю зон деформованого матеріалу, де виникає проміжковий стан (зони передруйнування), є те, що тут матеріал завжди є деформований за границю пружності і, що власне тут найінтенсивніші локальне пластичне течіння, взаємодія з навколишнім середовищем, дифузійні процеси та інші явища, які передують локальному руйнуванню матеріалу.

Щоб врахувати проміжкові стани в рамках механіки суцільного середовища, ввели нові розрахункові концепції і моделі, які стали основою нової гілки науки про міцність – механіки квазікрихкого руйнування матеріалів. Започаткували дослідження у цьому напрямку в 20–30-ті роки 20-го століття А. А. Гріффітс, Дж. Н. Тейлор, Е. О. Орован, а згодом – Дж. Р. Ірвін (див. літ. в [2]).

Результати досліджень з механіки втомного руйнування (за неklasичними підходами) подані в узагальнювальних статтях і монографіях О. Є. Андрейківа, В. С. Іванової, А. Я. Красовського, Н. А. Махутова, Г. М. Никифорчина, І. А. Одінга, О. П. Осташа, В. В. Панасюка, Г. С. Писаренка, В. І. Похмурського, О. М. Романіва, С. В. Серенсена, М. М. Стадника, В. Ф. Терентьєва, В. Т. Трощенко, Г. П. Черепанова, С. Я. Яреми, А. Carpinteri, Н. Kitagawa, S. Kocanda, K. Miller, J. F. Nott, P. Paris, J. Rice, R. Ritchie, D. Taylor, T. Yokobori та ін. (див. літ. в [2, 4–7]).

Серед найважливіших результатів досліджень втомного руйнування конструкційних матеріалів – розроблення стандартних методів випробувань, подання їх результатів у вигляді діаграм втомного руйнування (ДВР) і встановлення характеристик циклічної тріщиностійкості матеріалів [8–11]. Особливості таких випробувань та історія їх формування описані в працях [5, 10, 11]. Сказане стосується ситуації, коли руйнування відбувається за механізмами розриву або поздовжнього зсуву, тобто вздовж фронту тріщини (див., наприклад, [10]). Однак на сьогодні ще не розроблено ефективних стандартних методів випробувань для поперечного зсуву матеріалу у вершині (перпендикулярно до фронту) тріщини. Є лише окремі методики [7, 12], тобто в літературі є досить багато інформації про характеристики циклічної тріщиностійкості матеріалів на розрив, поздовжній зсув і мало – про поперечний зсув. Сучасному стану проблеми визначення характеристик циклічної тріщиностійкості на поперечний зсув та опису відповідних ДВР присвячено огляд [13].

Серед вищезгаданих виокремимо також дослідження припорогових ділянок ДВР матеріалу на переході стадії зародження макротріщини до стадії її росту. Вони стосуються визначення порогових значень коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) K_{th} або їх розмахів ΔK_{th} , нижче яких тріщина в даному матеріалі не росте. За важливістю і фізичним сенсом порогові значення КІН порівнюють [5, 11] із класичною границею витривалості – однією з основних характеристик, що описує опір конструкційного матеріалу втомному руйнуванню за класичними підходами. З одного боку, ця характеристика циклічної тріщиностійкості матеріалу особливо важлива для оцінювання довговічності елементів конструкцій, а з іншого – дуже чутлива до структури матеріалу, можливого закриття берегів у вершині тріщини, температури довкілля, частоти навантаження тощо. Щоб встановити порогові значення КІН, слід не тільки дослідити ріст макротріщини, а й стадії формування т.зв. “коротких тріщин” та їх зародження, бо “між цими стадіями нема чіткої границі” [5, 11]. “Тривалість періоду зародження макротріщини змінюється в широких межах. За різними оцінками вона складає 20...90% загальної довговічності залежно від матеріалу, розмірів і форми тіла (зокрема, наявності концентраторів напружень), характеру навантаження, властивостей середовища та інших експлуатаційних умов, а також прийнятих критеріїв поділу на періоди” [5]. Суттєвий вклад у ці комплексні дослідження внесли О. Є. Андрейків, Я. Л. Іваницький, В. С. Іванова, Г. М. Никифорчин, О. П. Осташ, В. В. Панасюк, О. М. Романів, В. Т. Трощенко, С. Т. Штаюра, С. Я. Ярема, М. W. Brown, K. J. Miller, Y. Murakami, J. R. Rice, R. O. Ritchie, D. Taylor та ін. (див. літ. в [2, 5]).

Важливим досягненням у теорії втомного руйнування матеріалів є аналітичний опис ДВР. Першим формулу її опису запропонував Паріс [14], а потім дещо модифікував С. Я. Ярема [5]. Для опису повної ДВР О. Є. Андрейків, Г. П. Черепанов

панов, С. Я. Ярема, С. І. Микитишин та інші дослідники запропонували формули, які подані у довідниках [4, 5].

Методи математичної теорії тріщин. Базовими параметрами у підходах механіки руйнування матеріалів є КІН у тілі з тріщинами. Розв'язкам основних задач теорії пружності для тіл з тріщинами (коли межа тіла піддана дії системи зусиль чи переміщень) присвячено багато публікацій, зокрема, монографій. Дані про КІН в околі вершин тріщин систематизували в довідниках М. П. Саврук [15], М. Н. Aliabadi [16], Ю. Мураками [17], D. P. Rooke і D. J. Cartwright [18], G. C. Sih [19] Н. Tada, P. C. Paris і G. R. Irwin [20]. У цих працях переважно розглядали прямолінійні тріщини, береги яких не контактують.

Задачі теорії пружності для тіл з тріщинами розв'язували різними методами. Огляди цих методів можна знайти в працях [4, 15, 20, 21]. У двовимірних задачах для тіл з тріщинами найуживанішими є методи скінченних елементів (МСЕ), граничних елементів, функції Гріна, сингулярних інтегральних рівнянь (СІР). Менше тепер використовують методи конформних відображень, граничних колокацій, об'ємних сил, асимптотичні методи тощо.

Одним із найефективніших можна вважати метод СІР, коли невідому (шукану) функцію подають як похідну від шуканої комплексної функції від розривів переміщень уздовж лінії тріщини за дії того чи іншого навантаження в заданій двовимірній пружній області. Такі рівняння ефективно розв'язують числовим методом механічних квадратур. У працях [21, 22] розвинуто метод СІР і на його основі отримано числові результати (КІН) для систем довільно розташованих прямолінійних тріщин у канонічних пружних областях: нескінченна площина, півплощина, смуга, області, обмежені коловими контурами. Згодом М. П. Саврук узагальнив цей підхід для криволінійних тріщин і умов гладкого контакту або защемлення берегів тріщин [23].

Модельні схеми контактної втоми. Контакт берегів тріщин. Як правило, в елементах пар трибоспрязень в околі тріщин виникає складний напружений стан, і розв'язати задачі для його визначення з урахуванням тріщин математично важко. Тому під час побудови розрахункових моделей використовують деякі спрощення. Зокрема, у рамках двовимірних моделей лінійної механіки руйнування пошкоджене тіло, за умов його циклічного навантаження, моделюють пружною півплощиною з тріщинами, а дію контртіла замінюють дією (переміщенням) певним чином розподілених на краю півплощини нормальних $p(x)$ і дотичних $q(x)$ зусиль. Ці зусилля відображають форму і розміри контртіла, тип контактної взаємодії, механічні характеристики матеріалів та поверхонь контакту тощо. Найпоширенішими модельними навантаженнями є зосереджена сила, рівномірний тиск, еліптичний (герцівський) розподіл контактної тиску $p(x)$. Переважно дотичні зусилля $q(x)$ пов'язують з нормальними $p(x)$ законом Амонтона–Кулона через коефіцієнт тертя f у контакті тіл, що дає можливість досить адекватно моделювати умови проковзування між тілами ($q(x) = fp(x)$). Для умов защемлення використовують розподіл Каттанео–Міндліна [24].

У літературі є багато результатів про КІН для півплощини з тріщинами. Їх детальні огляди зроблено в працях [21, 23, 25], а також у довідниках [15–20]. Однак розглянуті там навантаження здебільш не викликають контакту берегів тріщин. Насправді впродовж циклу контактування (переміщення або зміни модельного контактної навантаження) зазвичай береги тріщин контактують і цей контакт змінюється під час циклу. Це вимагає розв'язування складних контактних задач.

Серед конфігурацій областей для моделювання задач контактної взаємодії двох тіл найчастіше використовують півплощину з довільно орієнтованою крайовою або паралельною до межі тіла підповерхневою тріщиною.

Для півплощини з горизонтальною прямолінійною підповерхневою (внутрішньою) тріщиною, коли вздовж краю півплощини переміщається зосереджена сила або герцівський тиск, встановлено КІН залежно від розташування навантаження. Аналіз результатів та огляди відповідних публікацій здійснено в працях [26, 27]. Зауважимо, що публікації S. D. Sheppard, J. R. Barber і M. Comninou (див. [28]), K. Komvopoulos і S.-S. Cho (див. [29]), в яких наближено враховано контакт берегів тріщини і обчислено на основі СІР в дійсній формі [28] та МСЕ [29] КІН K_{II} , ΔK_{II} і карти контактування берегів тріщини, були одними із перших.

Крайовим прямолінійним нахиленим тріщинам у півплощині присвячено значно більше публікацій, ніж підповерхневим. Зокрема, за дії зосередженої сили на краю півплощини з крайовою перпендикулярною тріщиною D. P. Rooke і D. A. Jones [30] знайшли наближений аналітичний розв'язок (КІН), який різні автори використовують як функцію Гріна в задачах зі складнішими модельними навантаженнями та орієнтацією тріщини. В багатьох працях (див., наприклад, огляди [31–33]) розглядали герцівський розподіл контактної тиску з відповідною дотичною компонентою.

L. M. Keer і M. D. Bryant [34] розв'язали задачу, коли береги крайової тріщини контактують без тертя (умови гладкого контакту) або з невеликим тертям по всій довжині тріщини. З допомогою дислокаційного підходу вони звели вихідну задачу до системи двох дійсних СІР. О. П. Дацишин і Г. П. Марченко (див. [31]) розв'язали контактні задачі за умов частково гладкого контакту берегів крайової нахиленої тріщини під час руху герцівського навантаження вздовж краю півплощини, які звели до комплекснозначних СІР. Установлено КІН і межі ділянок контакту берегів тріщини.

Найбільше досліджень присвячено розв'язкам, коли береги крайової тріщини контактують з тертям по всій її довжині. Для цього застосовували різні методи. Найчастіше – МСЕ [35, 36]. У низці публікацій використано методи граничних елементів [33, 37], вагових функцій [38, 39], СІР [40, 41] тощо. Розраховані там максимальні значення КІН K_{II} та їх розмах ΔK_{II} під час одного циклу переміщення контактної навантаження автори цих публікацій також вжили для наближеного оцінювання контактної довговічності елементів деяких пар кочення.

Виокремимо важливу працю А. Ф. Bower [42], в якій для однієї конфігурації параметрів (орієнтація і довжина тріщини, тертя в контакті між тілами і берегами тріщини) знайдено КІН і зображено карти контактування її берегів з урахуванням найзагальніших умов: защемлення, проковзування з тертям, розкриття берегів. Подібно, як в праці [34], тут використано СІР в дійсній формі. Повніше КІН K_{II} і ΔK_{II} в одному циклі контакту за умов проковзування–зчеплення берегів тріщини досліджено в статтях [33, 41]. Огляд і аналіз одержаних аналогічних результатів у інших публікаціях здійснено в працях [31, 41].

В усіх вищезгаданих працях досліджували вплив тих чи інших експлуатаційних чинників на зміну КІН під час переміщення контактної навантаження вздовж краю півплощини, зокрема, тертя між тілами кочення і берегами тріщини, довжини і орієнтації тріщини, розміру ділянки контакту між тілами кочення, тиску мастила або іншого експлуатаційного середовища в тріщині.

Відзначимо, що розв'язки, отримані в працях [28, 34, 42], є тестовими. Зауважимо, що в пізніших дослідженнях часто нечітко сформульовано крайові умови, а також умови контактування берегів тріщини. Літературні результати не завжди корелюють між собою. Додамо, що в працях [43, 44] детально вивчено КІН та кінетику контактування берегів плоскої тріщини – внутрішньої або крайової (кругової, еліптичної) – у півпросторі під дією рухомого герцівського навантаження (циліндр, сфера). Ці, а також результати, наведені в довіднику [17] (під

ред. Ю. Мураками), одержано методом об'ємних сил. Вони, зокрема, важливі, щоб порівняти із даними, які отримують у рамках двовимірних задач.

Напрацьовані результати в галузі механіки втомного руйнування та математичної теорії тріщин стали основою для досліджень руйнування твердих деформівних тіл під час циклічного контактування.

Контактні взаємодії в трибоз'єднаннях, феноменологічні моделі. Як вже згадували [24, 45, 46], процеси втомного руйнування трибоз'єднань під час кочення, фретинг-втоми, фрикційної втоми та пульсівного контакту мають спільні ознаки і закономірності. Зокрема, в монографії [46], наведено експериментальні результати, а в [24] – деякі теоретичні про ці контактні взаємодії. Сьогодні цю концепцію активно розвивають.

Вже накопичено багато інформації про особливості і причини формування типових контактних-втомних пошкоджень в елементах трибоз'єднань. Першою працею, присвяченою вивченню природи пітингу, можна вважати “Pitting due to rolling contact” (S. Way, 1935 р.) [47], в якій описано дослідження підшипників і дисків із підшипникової сталі. Важливою також є праця Дж. Лундберга (G. Lundberg) і А. Пальмгрена (A. Palmgren) [48] (1947 р.) про відшарування і контактну втому довговічність підшипників. Прецизійні експериментальні дослідження контактної втоми і зношування через утворення відповідного пітингу і відшарувань на підшипниках кочення виконав у 1950–1970-их роках Б. І. Костецький [49]. Результати вивчення утворення контактних-втомних пошкоджень за контактної взаємодії фретинг-втоми узагальнив Р. Б. Уотерхауз у монографії “Фретинг-корозія” [50]. Огляди досліджень у цих напрямках у 1960–80-ті роки наведені в працях [45, 51–53].

У 1970–1990-х роках кількість публікацій про контактну втому інтенсивно зростає. Особливо активно досліджують контактну міцність та довговічність елементів системи колесо–рейка. Оpubліковано низку оглядових статей [32, 54–57]. Також вивчають поширення тріщин та контактну витривалість валків вальцювальних станів і валкових сталей [58–60], тіл підшипників кочення та підшипникових сталей [7, 61, 62], елементів зубчастих зачеплень та відповідних сталей [49, 63, 64].

У результаті накопиченого досвіду розроблено експериментальні стандарти [59, 65, 66 та ін.], згідно з якими для дослідження контактної втоми елементів пари кочення використовують переважно дводискові машини з діаметрами від 40 mm і товщиною від 10 mm з однакових або різних матеріалів за умов сухе тертя–волога (вода)–експлуатаційне мастило та різних контактних навантажень. Вивчають не тільки появу і ріст тріщин у приповерхневій зоні тіл кочення, а й довговічність, тобто кількість циклів кочення до появи (фіксації) в зоні контакту частинок (частинки) викришування.

Спостереження виявили, що в приповерхневій зоні контакту тріщини після зародження деякий (досить тривалий) час ростуть за механізмом зсуву практично прямолінійно (у своїй площині), а згодом – за механізмом нормального розриву. Великий об'єм експериментальних результатів про особливості руйнування (утворення пошкоджень), контактну довговічність найпоширеніших типів пар кочення (колесо–рейка, валки вальцювальних станів, зубчасті зачеплення), а також характеристики циклічної тріщиностійкості матеріалів отримали науковці японської (Y. Murakami, M. Kaneta, M. Ishida, H. Yatsuzuka та ін.) та англійської (K. Johnson, K. Miller, D. Fletcher, M. Brown, J. Beynon, M. Frolish, A. Kapoor, R. A. Smith та ін.) шкіл.

Очевидно, що для систематизації і формулювання критеріїв оцінювання контактної втоми конструкційних матеріалів трибоспряджень, а також узагальнен-

ня накопичених експериментальних даних виникла потреба створити теоретичні засади механіки втомного контактного руйнування.

У 70–90-х роках минулого століття деякі учені сформулювали перші теоретичні моделі з механіки втомного контактного руйнування, зокрема, для фретинг-втоми [30, 67, 68] та кочення [34, 42, 69]. Ці та запропоновані пізніше моделі [7, 35, 36, 59, 70–72] ґрунтуються на концепціях механіки втомного руйнування, розв'язках контактних задач теорії пружності для тіл з тріщинами і врахуванні визначальних експлуатаційних чинників (залишкові напруження, середовище, розподіл контактних зусиль і тертя між контактуючими тілами, частота навантаження, температура) того чи іншого типу трибоспряження. Критеріями локального руйнування під час поширення тріщин обирають переважно силові критерії лінійної механіки руйнування.

На сьогодні з'явилося багато нових досліджень і результатів, особливо про елементи системи колесо–рейка, які детально описано в оглядових статтях [27, 32, 73–76]. Також є нова інформація про поширення тріщин за умов контактної взаємодії фретинг-втоми [77–80], представлена на шостому і сьомому Міжнародних симпозіумах з фретинг-втоми (ISFF6, 2010; ISFF7, 2013). Розроблено методи стандартних випробувань на довговічність елементів фретинг-пар [81].

Пітинг і відшарування. З використанням вищезгаданих моделей та результатів нових експериментальних досліджень запропоновано механізми утворення найпоширеніших контактної-втомних пошкоджень – пітингу та відшарування.

У працях [7, 34, 42, 82] описано деякі механізми формування вісповидного пітингу в тілах кочення. Зокрема, припускається [34], що ямки (пітинги) за однонапрявленого кочення спричинені насамперед дією циклічних зсувних напружень у зоні контакту, що призводить до росту початкової крайової прямолінійної тріщини за механізмом поперечного зсуву з подальшим можливим викривленням траєкторії під дією розтягальних напружень і поширенням тріщини за механізмом розриву. Роль рідини (мастила) в зоні контакту тіл вбачають насамперед у зменшенні тертя між берегами тріщини, а можливий тиск мастила на береги тріщини не вважають причиною її росту до поверхні тіла кочення.

Автори публікацій [7, 42, 82] припускають, що макротріщини можуть зароджуватися як на ведених, так і ведучих поверхнях тіл пари кочення, а пітинг – тільки на поверхні веденого тіла у присутності рідини та тоді, коли зсувна тріщина нахилена під гострим кутом до поверхні кочення у напрямку переміщення контртіла. При цьому, як і в праці [34], вважають, що початкова макротріщина росте спершу (практично) прямолінійно за механізмом поперечного зсуву. Довжина такої зсувної макротріщини може бути досить великою [7], сумірною з розміром (довжиною) ділянки контакту. Пізніше, внаслідок тиску мастила на береги тріщини, починає діяти механізм нормального розриву, і вона повертає до поверхні, спричиняючи її викришування.

Відзначимо, що автори досліджень [7, 34, 42, 82] обмежуються даними про КІН та кути початкового відхилення θ_0^* [2, 21] для крайових прямолінійних тріщин. На основі цього вони прогнозують траєкторію другої криволінійної фази росту тріщини, внаслідок якої реалізується або й ні викришування поверхні тіла кочення. На цій основі також спробували оцінити [12, 34, 82] контактну довговічність приповерхневого шару тіл кочення. Однак таке прогнозування форми і розмірів пошкодження, а також довговічності не є достатньо обґрунтованим і може бути помилковим.

Деякі моделі утворення відшарування за умов контактної втоми кочення побудовані [60, 83–86] на великій кількості інженерних і лабораторних результатів. Тут вважають, що тріщини контактної втоми кочення зароджуються і на поверх-

ні, і під нею. Однак за відсутності суттєвих підповерхневих дефектів немає єдиної думки про причини зародження тріщин чи механізми їх поширення [59, 60, 83–86]. Зокрема, в праці [83] вважають, що в точках максимального зсувного напруження зароджуються підповерхневі тріщини, а в публікації [84] припускають, що мікротріщини можуть зароджуватися в нижній частині робочого загартованого шару. Навпаки, в працях [60, 85] автори дійшли висновку, що на практиці більшість руйнувань від відшарувань – результат зародження тріщин на поверхні через експлуатаційні інциденти, неоднорідні контактні тиски, тепловий шок тощо.

Є намагання [7, 59, 60, 86] пояснити поширення приповерхневих тріщин по колу на великі відстані паралельно поверхні валка або ж їх просування в глибину матеріалу. Зокрема, для розуміння механізмів руйнування від відшарування опорних валків запропоновано [59] кількісну модель механіки руйнування для контактної втоми кочення, де КІН K_I і K_{II} у вершинах нахилених до поверхні контакту поверхневих тріщин подано в кількісній формі та порівняно їх з пороговими значеннями характеристик циклічної тріщиностійкості K_{Ith} , K_{IIth} , щоб оцінити контактну довговічність опорних валків.

Траєкторії поширення приповерхневих тріщин. Оцінювання контактної довговічності. За циклічного контактування тіл і складного напруженого стану в зоні їх контакту тріщини ростуть уздовж криволінійних траєкторій. При цьому поширюється одна або система тріщин, утворюючи різноманітні типи пошкоджень поверхневого шару елемента трибоспряження: вісповидні та V-подібні ямки, відшарування, розкришування, затемнення і осідання поверхні через підповерхнєве галузження тріщин – “нора” (squat, dark-spot), каверни тощо. Для оцінювання довговічності контактуючих тіл важливо побудувати траєкторії розвитку приповерхневих тріщин, які й окреслюють форму та розміри контактної втоми пошкоджень. Кількість циклів до їх утворення визначає контактну довговічність тіла (елемента спряження). Також дуже важливо встановити конфігурації значень експлуатаційних параметрів і характеристик тріщиностійкості матеріалу, що можуть призвести до росту тріщин в глибину матеріалу і створити небезпеку зруйнування виробу (деталі). Ці процеси руйнування контактуючих тіл – предмет сучасних досліджень з механіки руйнування і вимагають розроблення адекватних розрахункових моделей. Наведений вище аналіз відомих публікацій свідчить про те, що цей (головний) акцент проблеми оцінювання контактної довговічності трибоз’єднань ще не одержав потрібного розвитку.

Колектив словенських учених розробив [87–89] теоретично-експериментальну методологію побудови траєкторій розвитку криволінійних тріщин, які формують ямки мікропітингу в елементах зубчастих зачеплень під дією контактної навантаження і тиску мастила на берегах тріщин. Траєкторію будують покроково зі сплайну прямолінійних відрізків з використанням МСЕ і критерію максимуму швидкості вивільнення енергії. Подібно, але застосовуючи в розрахунках метод СР, траєкторії формування ямок пітингу побудував автор праці [70] для приповерхневої зони підшипникових матеріалів. Але в публікаціях [70–87] дослідники практично не враховують тертя між берегами тріщини, яке суттєво впливає і на кут початкової орієнтації крайової тріщини, і на контактну довговічність елемента пари кочення. Також не взято до уваги характеристики циклічної тріщиностійкості матеріалів на зсув. Отримано [70] суперечливі результати, зокрема, про те, що пітинг може утворюватися без розклинювання берегів тріщини (без тиску мастила на береги).

У працях О. П. Дацишин та ін. [31, 40, 90–94] запропоновано новий підхід до розв’язання цієї проблеми. В межах механіки руйнування матеріалів сформульовано [90–94] розрахункову модель для дослідження процесів руйнування та прогнозування залишкової довговічності твердих тіл (елементів трибоспряжень)

під час їх циклічного контактування. В основі моделі – покроковий розрахунок траєкторій розвитку тріщин [91] за розв'язками СР двовимірних контактних задач теорії пружності для тіл з криволінійними тріщинами і критеріями локального руйнування за складного напруженого стану з урахуванням характеристик циклічної тріщиностійкості матеріалів на зсув і розрив та експлуатаційних умов трибоспряжень. Алгоритми побудови траєкторій розвитку тріщин у зоні контакту враховують зміну напружено-деформованого стану, викликаного як збільшенням довжини тріщини, так і переміщенням контртіла (зміною навантаження) в циклі контактування, а також можливу зміну механізму руйнування (поперечний зсув–нормальний розрив) під час поширення тріщини та тертя між її берегами. За цією моделлю розроблено комплексну методологію оцінювання залишкової довговічності пар кочення за критеріями утворення контактно-втомних пошкоджень. Модель реалізована для контактних взаємодій кочення [90–92] і фретинг-втомні [93, 94].

Її особливістю є виокремлення стадій росту тріщини в зоні контакту тіл за механізмами поперечного зсуву і нормального розриву. За моделлю і алгоритмами її реалізації побудовано траєкторії поширення приповерхневих початково прямолінійних тріщин, які формують такі типові контактно-втомні пошкодження, як вісповидний пітинг [91, 92, 95, 96], відшарування [92, 97], “темна пляма” [98, 99], “риски” (розкришування) [99, 100] в тілах кочення та спричиняють ріст крайових тріщин і утворення каверн в елементах фретинг-пар за умов проковзування–зчеплення між ними [90, 93, 94]. Також оцінено залишкову довговічність з урахуванням обох стадій росту тріщини під час утворення пітингу та відшарування в приповерхневій зоні деяких рейкових і валкових сталей. Наведено [90, 92] огляд з цієї тематики. Теоретично підтверджено відому гіпотезу Вея [47], сформульовану в результаті експериментальних досліджень виникнення пітингу в циклічно контактуючих тілах, коли в зоні контакту є змащувальне середовище.

Контактна втома і зношування. Підкреслимо ще таке. Процеси утворення контактно-втомних пошкоджень під час циклічного контактування твердих тіл тісно пов'язані зі зношуванням. Згідно з ГОСТ 27674–88 зношування – процес руйнування і відокремлення (фрагментів) матеріалу (частинок зношування) від поверхні твердого тіла і (або) накопичення залишкової деформації під час тертя тіл, який проявляється в поступовій зміні розмірів і (або) форми тіла. На думку таких відомих учених, як А. В. Чичинадзе, І. В. Крагельський, Є. М. Морозов, К. Holmberg [101–104] всюди, де відбуваються процеси утворення і відокремлення фрагментів матеріалу (його руйнування), можна застосовувати підходи механіки руйнування. Слід додати, що за розмірами частинок зношування вирізняють [104] процеси мікро- (10^{-6} – 10^{-4} м) і макрозношування (10^{-4} – 10^{-2} м). Таким чином, зношування можна розглядати як утворення та поширення тріщин на мікро- або макрорівнях у контактуючих тілах.

РЕЗЮМЕ. Представлен обзор методов теоретических и экспериментальных исследований контактно-усталостной долговечности элементов трибосоединений. Основное внимание уделено соединениям, работающим в условиях контакта качения с проскальзыванием и фреттинг-усталости. Также дан краткий обзор работ по механике усталостного разрушения и математической теории трещин – основополагающих для изучения контактной усталости. Выделена тема построения траекторий развития трещин в зоне циклического контакта упругих тел, которые играют важную роль в формировании типичных контактно-усталостных повреждений (в т.ч. питтинга и отслаивания) и в оценивании остаточной долговечности трибосоединений.

SUMMARY. The review of the methods of the theoretical and experimental researches of contact fatigue life time of tribojoint elements is presented. Basic attention is focused on joints that work in the conditions of rolling contact with slipping and under fretting fatigue. Also, a short review of the papers on the fatigue fracture mechanics and the mathematical theory of

cracks, that is basic for research in the contact fatigue, is carried out. The problem of construction of the cracks propagation paths in the cyclic contact zone of elastic bodies is paid much attention to. These paths play an important role in the formation of typical contact fatigue damages (including pitting and spalling) and in the estimation of tribojoint residual life time.

1. *Тот Л., Ярема С. Я.* Становлення науки про втому металів. Ч. 1: Роки 1825–1870 // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – **42**, № 5. – С. 87–94.
(*Tóth L., Yarema S. Ya.* Formation of the science of fatigue of metals. Part 1. 1825–1870 // Materials Science. – 2006. – **42**, № 5. – P. 673–680.)
2. *Панасюк В. В.* Механіка квазіхрупкого руйнування матеріалів. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.
3. *Писаренко Г. С., Лебедев А. А.* Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – К.: Наук. думка, 1976. – 416 с.
4. *Основы механики разрушения материалов* / В. В. Панасюк, А. Е. Андрейкив, В. З. Партон // Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. – К.: Наук. думка, 1988. – Т. 1. – 488 с.
5. *Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов* / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин, Н. А. Махутов, М. М. Стадник // Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. – К.: Наук. думка, 1990. – Т. 4. – 680 с.
6. *Handbook of fracture crack propagation in metallic structures* / Ed.: A. Carpinteri. – Amsterdam: Elsevier, 1994. – 834 p.
7. *Engineering against fatigue* / Eds.: J. H. Beynon, M. W. Brown, T. C. Lindley, R. A. Smith and B. Tomkins. – Rotterdam: A. A. Balkema Publ., 1999. – 730 p.
8. *РД 50-345-82.* Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик сопротивления раскрытию трещины (трещиностойкости) при циклическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 96 с.
9. *ASTM Designation E647-00: Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates.* – 2000.
10. *Іваницький Я., Штаюра С.* Методичні вказівки. Визначення характеристик тріщиностійкості матеріалів в умовах складного напруженого стану (нормальний відрив + поперечний зсув, нормальний відрив + поздовжній зсув) // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / Під заг. ред. В. В. Панасюка. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАНУ, 2004. – С. 723–732.
11. *Остап О. П.* Структура матеріалів і втомна довговічність елементів конструкцій // Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. пос. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. – Львів: Сполом, 2015. – Т. 15. – 312 с.
12. *Bold P. E., Brown M. W., and Allen R. J.* Shear mode crack growth and rolling contact fatigue // *Wear.* – 1991. – **144**. – P. 307–317.
13. *Ленковський Т. М.* Визначення характеристик циклічної тріщиностійкості сталей за поперечного зсуву (огляд) // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – **50**, № 3. – С. 29–37.
(*Lenkovs'kyi T. M.* Determination of the characteristics of cyclic crack resistance of steels under transverse shear (A Survey) // Materials Science. – 2014. – **50**, № 3. – P. 340–349.)
14. *Paris P. C., Gomes M. P., and Anderson W. E.* A rational analytic theory of fatigue // *The Trend in Eng.* – 1961. – **13**. – P. 54–61.
15. *Саврук М. П.* Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами // Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. / Под ред. В. В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1988. – **2**. – 620 с.
16. *Aliabadi M. H.* Database of Stress Intensity Factors // Southampton. – UK: Computational Mechanics Publications, 1996.
17. *Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2-х т.* / Пер. с англ. под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – 1016 с.
18. *Rooke D. P. and Cartwright D. J.* The compendium of stress intensity factors. – London: Her Majesty's Stationary Office, 1976. – 330 p.
19. *Sih G. C.* Handbook of stress-intensity factors. – Bethlehem: Lehigh University Press, 1973. – **1**. – 420 p.; 1974. – **2**. – 406 p.

20. Tada H., Paris P. C., and Irwin G. R. The stress analysis of cracks: Handbook. – Hellertown: Del Research Corp., 1973. – 385 p.
21. Панасюк В. В., Саврук М. П., Дацишин А. П. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках. – К.: Наук. думка, 1976. – 444 с.
22. Panasyuk V. V., Savruk M. P., and Datsyshyn O. P. A general method of solution of two-dimensional problems in the theory of cracks // Eng. Fract. Mech. – 1977. – **9**, № 2. – P. 481–497.
23. Саврук М. П. Двумерные задачи упругости для тел с трещинами. – К.: Наук. думка, 1981. – 324 с.
24. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
25. Кит Г. С., Кривцун М. Г. Плоские задачи термоупругости для тел с трещинами. – К.: Наук. думка, 1983. – 230 с.
26. Lunden R. Elastoplastic modeling of subsurface crack growth in rail/wheel contact problems // Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct. – 2007. – **30**. – P. 905–914.
27. Ekberg A., Åkesson B., and Kabo E. Wheel/rail rolling contact fatigue – Probe, predict, prevent // Wear. – 2014. – **314**, № 1–2. – P. 2–12.
28. Sheppard S. D., Barber J. R., and Comminou M. Subsurface cracks under conditions of slip, stick, and separation caused by a moving compressive load // Trans. ASME: J. Appl. Mech. – 1987. – **54**, № 2. – P. 393–398.
29. Komvopoulos K. and Cho S.-S. Finite element analysis of subsurface crack propagation in a half-space due to a moving asperity contact // Wear. – 1997. – **209**. – P. 57–68.
30. Rooke D. P. and Jones D. A. Stress intensity factors in fretting fatigue // J. Strain Anal. – 1979. – **14**, № 1. – P. 1–6.
31. Дацишин О. П., Марченко Г. П. Напружений стан півплощини з крайовою пологою тріщиною під герцівським навантаженням (Огляд) // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – **44**, № 1. – С. 23–34.
(Datsyshyn O. P., Marchenko H. P. Stressed state of a half plane with shallow edge crack under Hertzian loading (A survey) // Materials Science. – 2008. – **44**, № 1. – P. 22–34.)
32. Fletcher D. I., Franklin F. J., and Kapoor A. Rail surface fatigue and wear // Wheel-Rail Interface Handbook // Eds.: R. Lewis, U. Olofsson. – Cambridge, UK: Woodhead Publ., 2009. – P. 280–310.
33. Fletcher D. I., Smith L., and Kapoor A. Rail rolling contact fatigue dependence on friction, predicted using fracture mechanics with a three-dimensional boundary element model // Eng. Fract. Mech. – 2009. – **76**. – P. 2612–2625.
34. 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.
35. Bogdanski S. and Trajer M. A dimensionless multi-size finite element model of a rolling contact fatigue crack // Wear. – 2005. – **258**. – P. 1265–1272.
36. Ringsberg, J. W. and Bergkvist A. On propagation of short rolling contact fatigue cracks // Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct. – 2003. – **26**, № 10. – P. 969–983.
37. Akama M. and Mori T. Boundary element analysis of surface initiated rolling contact fatigue cracks in wheel/rail contact systems // Wear. – 2002. – **253**. – P. 35–41.
38. Beghini M., Bertiny L., and Fontanari V. Parametric study of oblique edge cracks under cyclic contact loading // Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct. – 2005. – **28**, № 1/2. – P. 31–40.
39. Fletcher D. I. and Beynon J. H. A simple method of stress intensity factors calculation for inclined surface-breaking crack with crack face friction under contact loading // Proc. Inst. Mech. Engrs, Part J: J. Eng. Tribol. – 1999. – **213**. – P. 481–486.
40. Datsyshyn O. P., Panasyuk V. V., and Glazov A. Yu. Modelling of fatigue contact damages formation in rolling bodies and assessment of their durability // Wear. – 2011. – **271**, № 1–2. – С. 186–194.
41. Вплив стискальних залишкових напружень на поширення зсувних поверхневих тріщин у залізничних рейках / О. П. Дацишин, Г. П. Марченко, А. Ю. Глазов, А. Б. Левус // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – **51**, № 2. – С. 83–90.
(Datsyshyn O. P., Marchenko H. P., Hlazov A. Yu., Levus A. B. Influence of compressive stresses on the propagation of surface shear cracks in railroad rails // Materials Science. – 2015. – **51**, № 2. – P. 235–243.)
42. Bower A. F. The influence of crack face friction and trapped fluid on surface initiated rolling contact fatigue cracks // Trans. ASME: J. Tribol. – 1988. – **110**, № 4. – P. 704–711.

43. Kaneta M. and Murakami Y. Propagation of semi-elliptical surface crack in lubricated rolling/sliding elliptical contact // Trans. ASME: J. Tribol. – 1991. – **113**. – P. 270–275.
44. Murakami Y., Kaneta M., and Yatsuzuka H. Analysis of surface crack propagation in lubricated rolling contact // ASLE Transactions. – 1985. – **28**, № 1. – P. 60–68.
45. Колесников Ю. В., Морозов Е. М. Механика контактного разрушения. – М.: Наука, 1989. – 220 с.
46. Пинегин С. В. Контактная прочность и сопротивление качению. – М.: Машиностроение, 1969. – 244 с.
47. Way S. Pitting due to rolling contact // Trans. ASME: J. Appl. Mech. – 1935. – **2**. – P. A49–A58.
48. Lundberg G. and Palmgren A. Dynamic capacity of rolling bearing // Acta Polytechnica, Ser. Mech. Eng. R.S.A.E.E. – 1947. – **1**, № 3. – P. 7–24.
49. Костецкий Б. И. Сопротивление изнашиванию деталей машин. – М.; К.: Машгиз, 1959. – 478 с.
50. Уотерхауз Р. Б. Фреттинг-коррозия. – Л.: Машиностроение, 1976. – 270 с.
51. Сосновский Л. А., Махутов Н. А., Шуринов В. А. Фреттинг-усталость: основные закономерности // Заводская лаборатория. – 1992. – **58**, № 8. – С. 45–62.
52. Сосновский Л. А., Махутов Н. А., Шуринов В. А. Фрикционно-механическая усталость: основные закономерности // Заводская лаборатория. – 1992. – **58**, № 9. – С. 46–63.
53. Сосновский Л. А., Махутов Н. А., Шуринов В. А. Контактно-механическая усталость: основные закономерности // Заводская лаборатория. – 1992. – **58**, № 11. – С. 44–61.
54. Rail defects: an overview / D. F. Cannon, K. O. Edel, S. L. Grassie, and K. Sawley // Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct. – 2003. – **26**, № 10. – P. 865–886.
55. Ekberg A. and Kabo E. Fatigue of railway wheels and rail under rolling contact and thermal loading – an overview // Wear. – 2005. – **258**. – P. 1288–1300.
56. Smith R. A. The wheel-rail interface – some recent accidents // Fatig. Fract. Engng Mater. Struct. – 2003. – **26**, № 10. – P. 901–907.
57. Zerbst U., Madler K., and Hintze H. Fracture mechanics in railway applications – an overview // Eng. Fract. Mech. – 2005. – **72**, № 2. – P. 163–194.
58. Оценка трещиностойкости крупных опорных валков прокатных станков при циклическом нагружении / В. А. Зазуляк, А. И. Дарчук, А. М. Легун, Я. Л. Иваницкий, В. В. Зубатый // Физ.-хим. механика материалов. – 1985. – № 4. – С. 93–95.
59. Frolish M. F., Fletcher D. I., and Beynon J. H. A quantitative model for predicting the morphology of surface initiated rolling contact fatigue cracks in back-up roll steels // Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct. – 2002. – **25**. – P. 1073–1086.
60. Kapadia B. M. and Marsden K. W. Spalling behaviour of back-up roll materials / 39th Mech. Working and Steel Proc. Conf. (MSWPC). – Warrendale: Iron and Steel Society, 1997. – P. 1–38.
61. Кудин И. И. Расчет износа и усталостного выкрашивания в подшипниках качения: Обзор // Сер. X: Подшипниковая промышленность. – М.: Центральный науч.-иссл. ин-т информации и технико-экономических исследований автомобильной промышленности ЦНИИТЭИавтопром, 1989. – 128 с.
62. Bhargava V., Hahn G. T., and Rubin C. A. Analysis of cyclic crack growth in high strength roller bearings // Theor. Appl. Fract. Mech. – 1986. – **5**, № 1. – P. 31–38.
63. Contact fatigue of automotive gears: Evolution and effects of residual stresses introduced by surface treatments / A. C. Batista, A. M. Dias, J. L. Lebrun, J. C. Le Flour, and G. Inglebert. // Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct. – 2000. – **23**. – P. 217–228.
64. Numerical modelling of crack path in the lubricated rolling–sliding contact problems / S. Glodež, R. Potočnik, J. Flašker, and B. Zafošnik // Eng. Fract. Mech. – 2008. – **75**. – P. 880–891.
65. The competitive role of wear and RCF in rail steel / G. Donzella, M. Faccoli, A. Ghidini, A. Mazzu, and R. Roberti // Eng. Fract. Mech. – 2005. – **72**. – P. 287–308.
66. Polish standard. Metals: Contact fatigue testing. PN–80 H–04324; 1980. – 13 p.
67. Троценко В. Т., Цыбанев Г. В., Хоцяновский А. О. Определение долговечности сталей при фреттинг-усталости // Проблемы прочности. – 1988. – № 6. – С. 3–8.
68. Hills D. A. and Nowell D. Mechanics of Fretting Fatigue. – Dordrecht: Kluwer Academ. Publ., 1994. – 236 p.
69. Kaneta M., Yatsuzuka H., and Murakami Y. Mechanism of crack growth in lubricated rolling/sliding contact // ASLE Trans. – 1985. – **28**, № 3. – P. 407–414.

70. *Goshima T.* Thermomechanical effects on crack propagation in rolling contact fatigue failure // *J. Thermal Stresses*. – 2003. – **26**. – P. 615–639.
71. *Kudish I. I. and Burris K. W.* Modern state of experimentation and modeling in contact fatigue phenomenon: P. I: Contact fatigue. Normal and tangential contact and residual stresses. Nonmetallic inclusions and lubricant contamination. Crack initiation and crack propagation. Surface and subsurface cracks // *Tribology Transac.* – 2000. – **43**, № 2. – P. 187–196.
72. *Ringsberg J. W.* Shear mode growth of short surface-breaking RCF cracks // *Wear*. – 2005. – **258**. – P. 955–963.
73. *Ekberg A.* Fatigue of railway wheels / Eds.: R. Lewis, U. Olofsson // *Wheel-Rail Interface Handbook*. – Cambridge, UK: Woodhead Publ., 2009. – P. 211–244.
74. *Lunden R. and Paulsson B.* Introduction to wheel-rail interface research / Eds.: R. Lewis, U. Olofsson // *Wheel-Rail Interface Handbook*. – Cambridge, UK: Woodhead Publ., 2009. – P. 3–33.
75. *Introduction to the damage tolerance behaviour of railway rails – a review* / U. Zerbst, R. Lundén, K.-O. Edel, and R. A. Smith // *Eng. Fract. Mech.* – 2009. – **76**. – P. 2563–2601.
76. *Material concepts for top of rail friction management – classification, characterization and application* / R. Stock, L. Stanlake, C. Hardwick, M. Yu, D. Eadie, and R. Lewis // *Wear*. – 2016. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2016.05.028>
77. *T-stress based short crack growth model for fretting fatigue* / J. Bellecave, S. Pommier, Y. Nadot, J. Meriaux, and J. A. Araújo // *Tribology Int.* – 2014. – **76**. – P. 23–34.
78. *Hattori T., Kien V. T., and Yamashita M.* Fretting fatigue life estimations based on fretting mechanisms // *Tribology Int.* – 2011. – **44**. – P. 1389–1393.
79. *Prediction of fretting fatigue crack initiation and propagation lifetime for cylindrical contact configuration* / R. Hojjati-Talemi, M. A. Wahab, J. D. Pauw, and P. D. Baets // *Tribology Int.* – 2014. – **76**. – P. 73–91.
80. *On the damage mechanisms of bending fretting fatigue* / J. F. Peng, M. H. Zhu, Z. B. Cai, J. H. Liu, K. C. Zuo, C. Song, and W. J. Wang // *Tribology Int.* – 2014. – **76**. – P. 133–141.
81. *Neu R. W.* Progress in standartization on fretting fatigue terminology and testing // *Tribology Int.* – 2011. – **44**. – P. 1371–1377.
82. *Kaneta M. and Murakami Y.* Effects of oil hydraulic pressure on surface crack growth in rolling/sliding contact // *Tribology Int.* – 1987. – **20**, № 4. – P. 210–217.
83. *Nayak L. and Paul K.* Contact fatigue failure of rolls of hot strip mill // *Indian J. Techn.* – 1979. – **17**. – P. 27–34.
84. *Tait W. H.* Roll shop. P. 1: The nature and causes of in service defects / Eds.: R. B. Corbett // *Rolls for the Metalworking Industries*. – Warrendale: Iron and Steel Society, 1990. – P. 135–149.
85. *Cause and prevention of spalling of back-up rolls for hot strip mill* / Y. Ohkomori, I. Kitagawa, K. Shinozuka, R. Miyamoto, S. Yazaki, and M. Inoue // *Tetsu-to Hagane*. – 1987. – **73**. – P. 691–697.
86. *Ohkomori Y., Sakae C., and Murakami Y.* Mode II crack growth analysis of spalling behaviour for strip mill back-up roll // 42nd MSWP Conf. Proc. of the ISS, 2000. – Vol. XXXVIII. – P. 723–729.
87. *Numerical simulation of surface pitting due to contact loading* / J. Flašker, G. Fajdiga, S. Glodež, and T. K. Hellen // *Int. J. Fatig.* – 2001. – **23**. – P. 599–605.
88. *Numerical modelling of micropitting of gear teeth flanks* / G. Fajdiga, J. Flašker, S. Glodež, and T. K. Hellen // *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.* – 2003. – **26**, № 12. – P. 1135–1143.
89. *Modelling of surface crack growth under lubricated rolling–sliding contact loading* / B. Zafošnik, Z. Ren, J. Flašker, and G. Mishuris // *Int. J. Fract.* – 2005. – **134**. – P. 127–149.
90. *Дацисьин О. П.* Довговічність 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.)
91. *Дацисьин 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.)

92. *Datsyshyn O. P., Panasyuk V. V., and Glazov A. Yu.* The model of the residual life time estimation of trybojoint elements by formation criteria of the typical contact fatigue damages // *Int. J. Fatig.* – 2016. – **83**, P. 2. – P. 300–312.
93. *Панасюк В. В., Даццишин О. П., Щур Р. Б.* Залишкова довговічність твердих тіл, що контактують в умовах фретинг-втоми // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2000. – **36**, № 2. – С. 5–19.
(*Panasyuk V. V., Datsyshyn O. P., and Shchur R. B.* Residual durability of solids contacting under conditions of fretting fatigue // *Materials Science.* – 2000. – **36**, № 2. – P. 153–169.)
94. *Datsyshyn O. P. and Kadyra V. M.* A fracture mechanics approach to prediction of pitting under fretting fatigue conditions // *Int. J. Fatig.* – 2006. – **28**, № 4. – P. 375–385.
95. *Даццишин О. П., Левус А. Б.* Ріст крайової тріщини під тиском рідини в околі її вершини // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2003. – **39**, № 5. – С. 120–122.
(*Datsyshyn O. P. and Levus A. B.*, Propagation of an edge crack under the pressure of liquid in the vicinity of the crack tip // *Materials Science.* – 2003. – **39**, № 5. – P. 754–757.)
96. *Datsyshyn O. P. and Panasyuk V. V.* Pitting of the rolling bodies contact surface // *Wear.* – 2001. – **251**. – P.1347–1355.
97. *Даццишин О. П., Копилець М. М.* Прогноз довговічності тіл кочення за розвитком підповерхневої тріщини // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2003. – **39**, № 6. – С. 13–24.
(*Datsyshyn O. P. and Kopylets' M. M.* Prediction of the service life of rolling bodies according to the development of a subsurface crack // *Materials Science.* – 2003. – **39**, № 6. – P. 765–779.)
98. *Панасюк В. В., Даццишин О. П., Марченко Г. П.* Про ріст тріщин в тілах кочення за умов сухого тертя та зволоження // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2001. – **37**, № 1. – С. 7–16.
(*Panasyuk V. V., Datsyshyn O. P., and Marchenko H. P.* Crack growth in rolling bodies under the conditions of dry friction and wetting // *Materials Science.* – 2001. – **37**, № 1. – P. 1–11.)
99. *Panasyuk V. V., Datsyshyn O. P., and Levus A. B.* Evolution of a system of edge cracks in the region of rolling bodies cyclic contact / Eds. A. Neimitz // *ECF-14, Fract. Mech. Beyond 2000.* – Sheffield, UK: EMAS Publ., 2002. – V. I/III. – P. 609–616.
100. *Даццишин О. П., Левус А. Б.* Коефіцієнти інтенсивності напружень для системи крайових паралельних тріщин у півплощині під дією герцівських зусиль на її межі // *Машинознавство.* – 2000. – № 11. – С. 9–15.
101. *Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С.* Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 530 с.
102. *Морозов Е. М., Зернин М. Б.* Контактные задачи механики разрушения. – М.: Машиностроение, 1999. – 544 с.
103. *Справочник по триботехнике: в 3-х т. / Под. ред. М. Хебди, А. В. Чичинадзе.* – М.: Машиностроение, 1989.
104. *Holmberg K.* Tribology in reliability engineering / Eds. F. Franek, W. J. Bartz, A. Pauschitz // *Tribology 2001: scientific achievements, industrial applications, future challenges // Plenary and Session Key Papers from the 2nd World Tribology Congress (WTC–2001) (Vienna, Austria, 3–7 September 2001).* – Vienna: The Austrian Tribology Society, 2001. – P. 13–19.

Одержано 28.06.2016