

Шалапко Ю.І.,***Радек Н.,******Бонек М.*****

*Хмельницький національний університет,

м. Хмельницький, Україна

** Політехніка Свентокшиська,

м. Кельце, Польща

*** Політехніка Сласька,

м. Глівіце, Польща

ІЄРАРХІЯ ГЛОБАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ФРЕТИНГУ**Вступ**

Значні досягнення науковців у вивченні природи виникнення фретингу, його механізмів та наслідків не достатньо повно описують перехідні процеси, що відбуваються в інтерфейсі двох тіл, як у відкритій динамічній системі і характеризують відповідний стан контактних поверхонь у довготривалій перспективі. В границях глобальної еволюції фретинг-процесу номінальний контакт двох поверхонь на початку перебуває в стані повного зчеплення («новий виріб»), який прямує до повного проковзування («старий виріб»). Природно, що останній стан є втратою цілісності з'єднання і слугуватиме критерієм працездатності механічної конструкції в цілому. Підводячи підсумки, можна зазначити, що вся сукупність застосованих засобів і методик дозволила підтвердити фундаментальне явище: всі кінетичні криві зносу мають циклічний характер і є результатом періодичної зміни стану поверхні. Пояснення періодичних змін характеристик стану контактних матеріалів при зношуванні дозволяє дати оцінку кінетики накопичення пошкоджень. Питання: яким чином ці зміни впливають на динамічний стан номінально-нерухомого фрикційного з'єднання (ННФЗ), залишається відкритим.

Ставиться задача інтегрувати етапи перебігу фретинг-процесів у єдину еволюційну модель, яка дасть змогу в залежності від вхідних параметрів динамічної системи (маса деталей, частота вібрацій, технологічного натягу чи затиску) проводити діагностику контакту, з точки зору його номінальної цілісності, яка напряму пов'язана зі структурною еволюцією поверхневих шарів.

Основи еволюційного підходу до механічних систем з тертям та фретингом

Основною особливістю еволюційних теорій нелінійних динамічних систем є нестійкість руху. З точки зору фретинг-процесів, рух системи або її еволюція легко інтерпретується відносним переміщенням двох поверхонь під дією циклічного тангенціального навантаження. Для малоамплітудного фретингу дійсні переміщення однієї поверхні відносно іншої є доволі складними, що пояснюється динамікою режиму зчеплення-проковзування (stick-slip regime), структурною динамікою часткового проковзування в контакті, значною пластикою в контакті, автоколиваннями та мікропроковзуваннями, циклічним навантаженням та шумом.

Еволюційний підхід до опису трибосистеми полягає у тому, що матеріал поверхневого шару, деформується циклічно й розглядається як функціональна система, яка в умовах безперервного притоку енергії ззовні, починає проявляти ознаки адаптації до зовнішніх чинників: виявляються ефекти пам'яті, спадковості, самоорганізації, фазові перетворення, автоколивання і нарешті йде закономірний процес деградації поверхонь. З погляду такого підходу моделювали зношування такі вчені як Л. Бершадській, Н. Буше, В. Іванова, Б. Костецький та ін.

Серед функціональних математичних моделей, а такі є метою наших досліджень, ієрархічні рівні відображають ступінь деталізації динаміки фретинг- процесів. З цієї точки зору звичайно виділяють три основні рівні: мікро-, макро- і метарівні. Математичні моделі мікрорівня описують процеси в системах з розподіленими параметрами (в континуальних системах), а математичні моделі макrorівня - в системах із зосередженими параметрами (в дискретних системах). Для перших, фазові змінні, можуть залежати як від часу, так і від просторових координат, а в других - тільки від часу [1].

Основною формою динамічної (еволюційної) моделі макrorівня є однорідні диференціальні рівняння або їх системи разом із заданими початковими умовами [2]. Незалежним змінним в таких моделях буде час, а шуканими - фазові змінні, які характеризують стан системи (в наших дослідженнях переміщення та швидкості елементів інтерфейсу у ННФЗ).

Якщо для об'єкту досліджень вдасться виділити кількісну характеристику важливих властивостей або поєднати їх у надійнішу, довговічнішу, зносостійкішу, ціліснішу, а також встановити їх зв'язок із фазовими змінними за допомогою дійсної функції, то можна говорити про оптимізацію технічного об'єкту по критерію, що визначається цією функцією.

Ієрархія глобальної моделі фретингу

Грунтуючись на досвіді власних та інших досліджень фретинг-процесів, представимо ієрархічну модель для номінально-нерухомих з'єднань з точки зору втрати їх цілісності. На рис. 1 представлена чотирьох-рівнева система, яка узагальнює глобальну проблему цілісності ННФЗ.

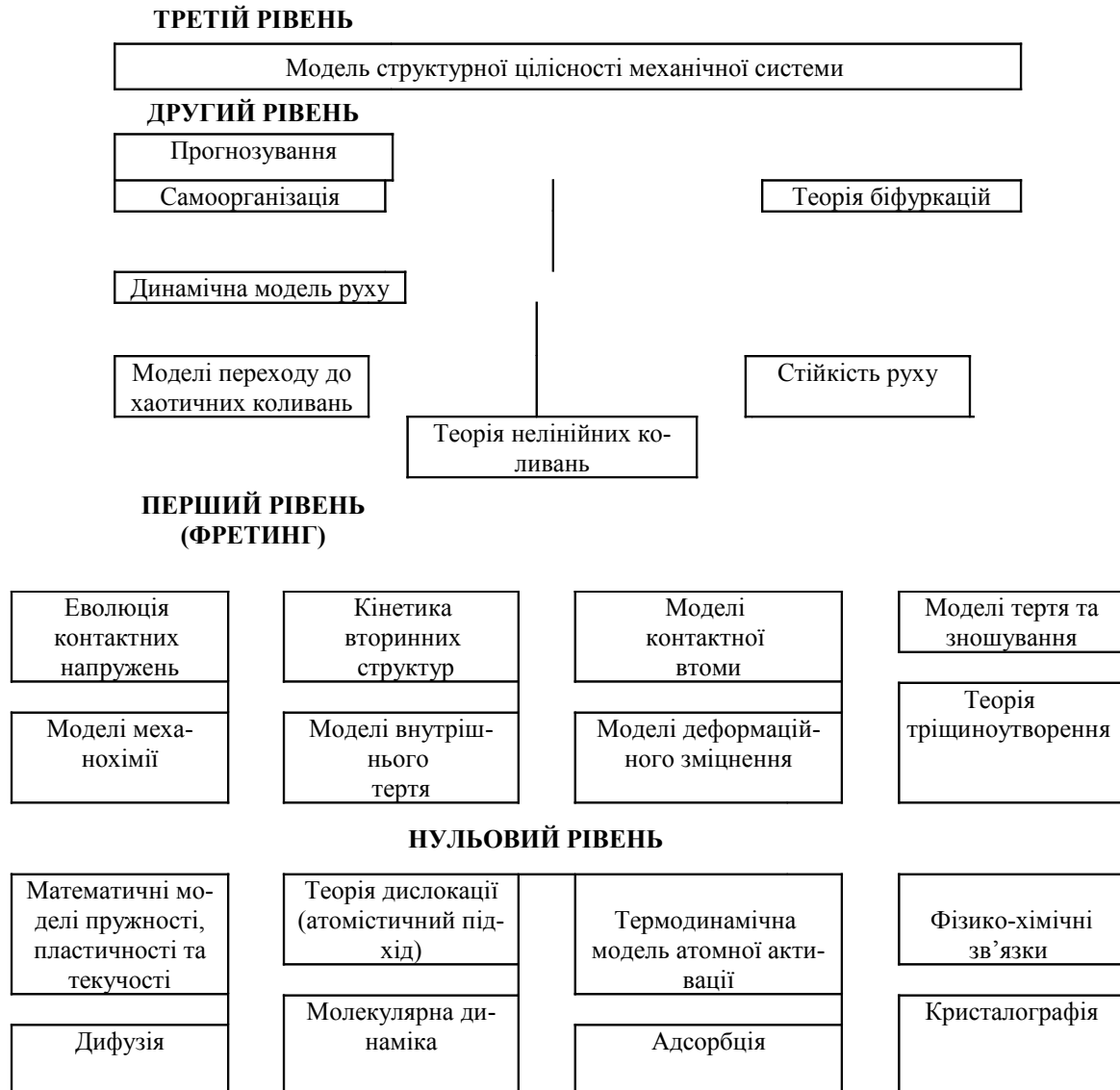


Рис. 1 – Ієрархічна модель структурної цілісності ННФЗ

Нульовий рівень охоплює атомарний й молекулярний рівень будови матерії та її контактну взаємодію. В першу чергу це стосується міжатомних сил Ван-Дер-Вальса, зародження, розмноження та накопичення дислокацій, хімічних реакцій тощо. Перший та другий рівень умовно можна класифікувати як макрорівень і обумовлює в собі фрикційні та динамічні явища при фретингу. Відносний рух двох поверхонь є першопричиною та обов'язковою умовою для протікання фретингу.

Початковий стан системи визначається зовнішніми параметрами навантаження і фізико-механічними властивостями поверхневих шарів. Потім, саме процеси циклічного навантаження і фретингу призводять до еволюції руху динамічної системи в напрямку її розхитування та втрати номінальної нерухомості. Тобто фретинг-процеси є рушійною силою зміни відносного руху двох поверхонь при умові сталості зовнішніх чинників навантаження. На деякому етапі вплив фретингу втрачається і режим мікропереміщень переходить до зворотно-поступального тертя з амплітудою більше 100 мкм.

Моделювання фретинг-процесів і руйнування, не дивлячись на численні рівні ієрархічності цих процесів, фактично не виходить за рамки традиційних підходів і моделей механіки суцільних середовищ. Частково така ситуація пов'язана з об'єктивними складнощами, що утрудняють виконання математичних розрахунків в достатньо широкому інтервалі масштабів, а також, у відсутності стрункої і ясної методичної концепції ієрархічного моделювання. Фактично ніхто строго не вивчав поверхню розділу двох тіл як динамічну систему і математично не досліджував еволюційні властивості систем рівнянь, що описують

динаміку мікропереміщень в контактi. Таке положення справ не випадково і пояснюється труднощами, з якими стикається теорія самоорганізації або нелінійна динаміка при теоретичному моделюванні еволюції конкретних фізичних систем. В присутності дисипативних чинників фретинг-процесу активність системи може бути пригнічена і вона знаходить рівновагу – довготривала експлуатація спряження без втрати його функціональних можливостей. В іншому випадку, вона еволюціонує по шляху самоорганізації – поступове, латентне руйнування контакту.

Для виконання задачі ієрархічного моделювання фретинг-процесу необхідно у рівняннях руху ввести зворотні зв'язки, які повинні забезпечити конкуренцію в середовищі між стабілізуючою дією дисипативних процесів і прагненням системи до отримання рівноваги. Таким пріоритетним зв'язком нами визначена залежність сили тертя від відносної швидкості проковзування. З вищевикладеного ясно, що ієрархічне моделювання яке відтворює еволюцію фретинг-процесів по законах нелінійної динаміки, повинне спиратися на систему нелінійних рівнянь механіки суцільних середовищ, що враховують дисипацію, швидкість навантаження (частоту коливань), нелінійність характеристики тертя, часові перебіги сил тертя та тиску. На сьогодні об'єднання різних явищ в єдину модель, не говорячи про моделі різних рівнів ієрархії супроводжується значними складнощами не тільки в плані технічного виконання, а й принциповими.

В багатьох експериментальних даних по дослідженню фретингу спостерігається виникнення різного виду неоднорідностей, наприклад ділянки локалізованої деформації, мобільних вторинних структур або сформованого третього тіла в границях однієї поверхні (рис. 2). Динамічна неоднорідність проявляється у перехідних моментах при зміні характеру вібраційного руху, що сформувалася внаслідок внутрішніх нелінійних властивостей системи. Досвід підказує, що просторовий розподіл і характерні масштаби неоднорідностей при фретингу дозволяють порівняно легко об'єднати динамічні та фрикційні масштаби моделювання, тобто перший та другий рівень ієрархії.

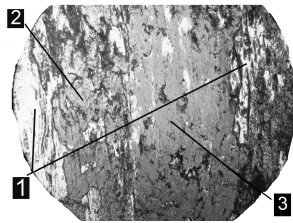


Рис. 2 – Структурна неоднорідність плями контакту при фретингу з амплітудою 35 мкм:
1 – плями локальної пластичної деформації;
2 – рухомий шар вторинних окислів;
3 – ділянка щільно упакованих вторинних структур

Глобальна еволюційна модель фретинг-процесів

Розглядаючи фретинг-процеси в контексті цілісності конструкцій та з'єднань можна розділити періоди динамічної поведінки контакту в залежності від відносного переміщення двох деталей. З більш ніж вагомим 50 параметрів, які описують фретинг [4], картина відносного проковзування є найбільш інформативною з точки зору працездатності з'єднання, математичної обробки осцилограм, діагностики, прогнозування і найголовніше, має цілком визначений еволюційний тренд в напрямку збільшення відносного зміщення, що не підтверджується для сили тертя, температури, тиску та інших параметрів.

Динамічний відгук на вібраційне збурення інтерфейсу було ідентифіковано у трьох режимах: зчеплення, часткового проковзування (тангенціальний контакт Міндліна) та глобальне ковзання поверхонь [5]. Для контакту без змащення ці три режиму описуються аналізом трьох параметрів: тангенціальної сили, нормального навантаження та амплітуди відносного зміщення. Однак, починаючи з середини 90-х років S. Fouvry, P. Kapsa, Z.R. Zhou та L. Vincent [6] виділили ще один сталий режиму фретингу, які вони охарактеризували як змішаний (ЗРФ). Дійсно, при деяких співвідношеннях параметрів фретингу, гістерезисна петля “тангенціальна сила – переміщення” еволюціонує не в сторону збільшення відносного проковзування, а навпаки до стану зчеплення поверхонь.

На рис. 3 представлена еволюція гістерезисних петель для випадку, що розглядався вище. В режимі часткового проковзування контакт може перебувати тривалий час і практично є часом фактичної експлуатації з'єднання. Під час цієї стадії відбувається поступовий перерозподіл контактних напружень, руйнування за механізмом багаточислової втоми центральної зони контакту, окислення та зношування периферійної зони контакту. Все це призводить до наближення відношення розміру зони зчеплення та зони проковзування до деякого критичного значення, за яким наступає момент проковзування по всій плямі контакту (рис. 3, б).

Третій режим (рис. 3, в) відповідає сталому перебігу фретинг-зношування. На нашу думку, слід виділити в окремий випадок критичний режим (рис. 3, б) стану контактної пари з двох принципів мір-

кувань. А саме: перебування інтерфейсу в такому стані є межею за якою втрачається номінальна нерухомість контакту.

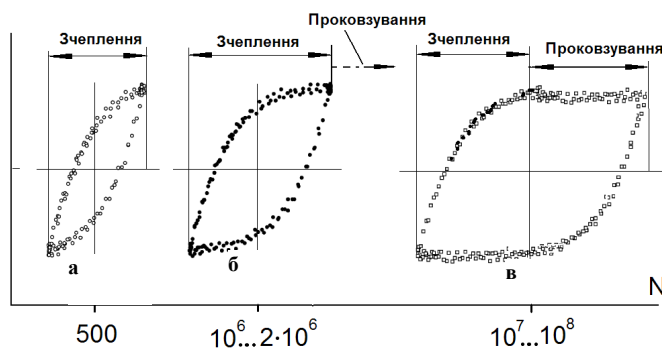


Рис. 3 – Довготривала еволюція гістерезисних петель:
а – початковий стан номінального зчеплення;
б – критичний стан на межі зчеплення -проковзування;
в – стан тотальної мобілізації (рухомості) контакту

З іншого боку, такий стан характеризується динамічною несталістю контакту, при якій найменша зміна будь-якого параметру призводить до переходу в режим, так званого, динамічного зчеплення-проковзування (РДЗП). Останній характеризується цілим рядом ще не досліджених явищ, які стосуються динаміки систем з сухим тертям та фретинг-процесами. В першу чергу, це стосується явищ що супроводжують нестационарні фрикційні коливання: квазіперіодичність, автоколивання, резонанс, хаотичні коливання. Враховуючи те, що амплітуда вимушених коливань, як правило, є сталою і те, що при переході до проковзування спостерігається зменшення механічного фактору із-за значного падіння сили тертя, можна прогнозувати довготривалість перебування контакту в такому стані. Експериментальні дослідження надалі підтвердили сталість існування РДЗП.

Таким чином, враховуючи чинники фретинг-процесу (номінальний тиск та амплітуду), які є керуючими параметрами еволюції гістерезисних петель, складемо діаграми режимів фретингу. Враховуючи загальну тенденцію до втрати цілісності ННФК, з різних сценаріїв перебігу процесу виділимо такий механізм при якому відбувається падіння тиску в контакті та збільшення абсолютного значення відносного зміщення поверхонь. Такий сценарій може мати свої відмінності на кожному етапі циклічного навантаження але ж в цілому описується трендом еволюції контакту у напрямку глобального проковзування (рис. 4, 5).

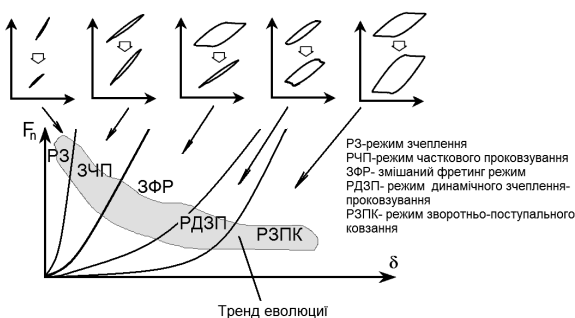


Рис. 4 – Глобальна еволюція гістерезисних петель в площині чинників фретингу: нормального тиску та амплітуди проковзування

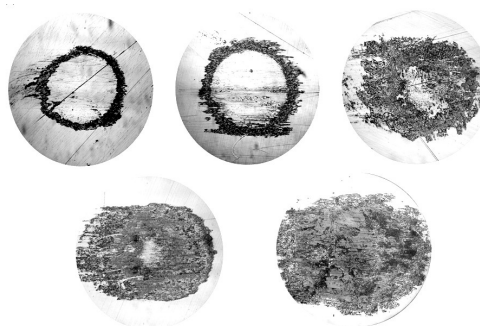


Рис. 5 – Трансформація плями контакту під дією циклічного навантаження від стану зчеплення до глобального проковзування

В області тренду еволюції можуть реалізовуватись різні сценарії перебігу фретинг-процесу в інтерфейсі контактної пари. Діаграми на рис. 6 відображають еволюційну модель фретинг-процесів у ННФК у бік втрати номінальної цілісності з'єднання.

Таким чином, спочатку за певних зовнішніх умов динамічна система перебуває у відповідному стаціонарному стані. Якщо змінити параметр керування (наприклад, частоту, амплітуду чи нормальний тиск), то первинний стан стає нестійким і повинен поступитися місцем новому стану, який має більш високий ступінь порядку, тобто більш сильно структурований. На рис.6 представлена комп'ютерна симуляція осцилограм мікропереміщень, які виникають при кінематичному фрикційному збудженні амплітудами 3,22 ... 25,00 мкм. Слід відмітити, що втрата номінальної цілісності контакту у вигляді початку мікропроковзування відбувається при надмалій зміні амплітуди коливань з 3,22 мкм до 3,25 мкм (рис. 6). Це свідчить про амплітудну границю стійкості контакту при даних характеристиках інтерфейсу. Надалі

система проходить кілька еволюційних етапів, які наочно відображені у відповідних фазових портретах (рис. 6).

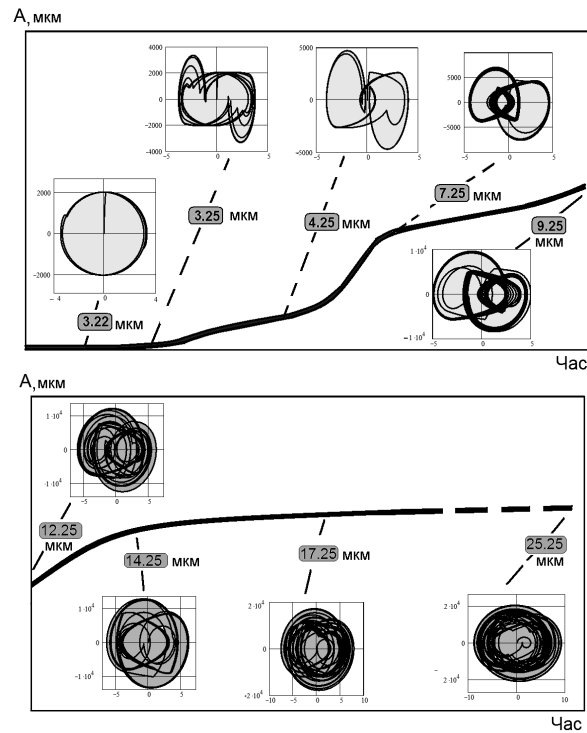


Рис. 6 – Еволюція амплітуди відносного переміщення поверхонь (експериментальна крива за 60 годин осциляцій) та відповідні фазові портрети на характерних ділянках (комп'ютерна симуляція)

Обговорення результатів та висновки

Представлена якісна еволюційна модель фрикційної взаємодії двох тіл номінально-нерухомого з'єднання при вібраційному динамічному навантаженні. Розглядаючи фретинг-процеси в контексті цілісності конструкцій та з'єднань, можна, в залежності від відносного переміщення двох деталей, визначити періоди динамічної поведінки контакту. Глобальна еволюція станів для ННФК полягає у природній зміні режимів фретинг-процесу:

- режим номінального зчеплення;
- часткове проковзування;
- змішаний режимів фретингу;
- режим динамічного зчеплення-проковзування;
- режим зворотно- поступового руху (суцільного ковзання).

Нижню границю РДЗП встановлюємо такою, при якій проковзування поверхонь є співрозмірними з величинами пружно-пластичної деформації контакту у стані зчеплення (повного попереднього зміщення). Верхню границю будемо вважати такою, при якій амплітуда проковзування не перевищує розмірів контурних плям контакту. В залежності від нормального тиску нами встановлено, що РДЗП має амплітудні границі від 1 ... 3 до 40 ... 70 мкм.

Література

1. Шалапко Ю.І. Перехідні процеси в системах з сухим тертям і диференціальних рівняннях // Вісник Технологічного університету. – 2003. – Ч. 1, т. 2. – № 6. – С. 258-262
2. Костоґриз С.Г., Шалапко Ю.І. Постійне тертя та встановлення в динамічних моделях номінально-нерухомих фрикційних з'єднань // Вісник Хмельницького національного університету – 2006. – № 6. – С. 150-155
3. Шалапко Ю.І. Моделювання та особливості тертя при переході від зчеплення до проковзування // Вісник Хмельницького національного університету – 2007. – № 1. – С. 234-241
4. Beard J. An investigation in to the mechanism of fretting-fatigue // Ph.D.Thesis, University of Salford. – 1982.
5. O. Vingsbo, S. Soderberg. On fretting maps /// Wear 126. – 1988. – P. 131–147.

6. S. Fouvry, Ph. Kapsa, L. Vincet Analysis of sliding behaviour for fretting loading: determination of transition criteria // Wear 185. – 1995. – P. 21–46.

Надійшла 01.06.2010