**Шалапко Юрій Іванович. Еволюційні моделі фретинг-процесу у номінально-нерухомому фрикційному контакті : Дис... д-ра наук: 05.02.04 - 2009.**

|  |  |
| --- | --- |
| |  | | --- | | **Шалапко Ю. І. Еволюційні моделі фретинг-процесу у номінально-нерухомому фрикційному контакті.** –**Рукопис.**  Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах. – Хмельницький Національний університет, 2009.  У дисертації вирішена науково-технічна проблема підвищення довговічності номінально-нерухомих фрикційних з’єднань, що має важливе значення у забезпеченні довготривалої експлуатації відповідальних конструкцій та вузлів, які експлуатуються в полі вібраційного навантаження. Методами математичного моделювання та комп’ютерної симуляції розроблена еволюційна модель динамічної поведінки контакту. Модель основана на математичних формулюваннях особливостей фрикційної взаємодії поверхонь у умовах малих швидкостей проковзування (менше 1 мм/с), а саме в околицях нульової швидкості при реверсивному русі поверхонь. Досліджені динамічні передумови виникнення та еволюції фретинг-процесу у контакті металевих поверхонь. Описані якісні та кількісні характеристики фретингостійкості конструкційних матеріалів при циклічних мікрозміщеннях менше 15 мкм. Окремо розроблені питання міцності поверхневих шарів для змішаного контакту. Визначений теоретично та підтверджений експериментально режим динамічного зчеплення–проковзування для фретинг-процесу, як самий небезпечний з точки зору максимальної концентрації комплексу фрикційної та вібраційної активності у контакті. Осцилограми у вигляді масиву часових рядів аналізувались Фур’є-перетворенням, розрахунком показника Ляпунова, побудовою перерізів Пуанкаре та вейвлет-перетворенням.  Запропонований спосіб підвищення фретингостійкості номінально-нерухомих фрикційних з’єднань комбінованою обробкою поверхонь електроіскровим легуванням твердими сплавами з наступним лазерним опромінюванням. Відповідна щільність покриття поверхні лазерним опромінюванням створювала комірки різних розмірів, що призводило до армування поверхні. | |
| |  | | --- | | 1. Невід’ємною і важливою складовою проблеми забезпечення працездатності відповідальних номінально-нерухомих фрикційних з’єднань є врахування циклічних відносних мікропереміщень у контакті. Дослідження фрикційних явищ у реальних ННФЗ, а також аналіз розв’язків контактних задач виявили особливу роль мікропереміщень у формуванні контактної взаємодії тіл та процесах руйнування поверхонь. Створення еволюційної моделі контактної взаємодії при мікропереміщеннях дозволило би об’єднати у єдине ціле динамічні (сили інерції, відносні швидкості, прискорення, частоти коливань) та фрикційні (сила тертя, амплітуди проковзування) складові фретинг-процесу.  2. Спроектоване, виготовлене та захищене патентами дослідне обладнання для реалізації нових підходів до визначення динамічних та фрикційних характеристик номінально-нерухомого фрикційного контакту.  3. Приймаючи до уваги особливості тертя при малих відносних швидкостях, була сформована концепція пружно-пластичного квазістатичного контакту з врахуванням параметра пластичності у характеристиці кривої контактного початкового навантаження.  4. Розроблена концепція еволюційної чотирирівневої моделі фретинг-процесів як відкритої динамічної системи. В цій моделі фретинг-процес розглядається як внутрішній рушійний чинник, що призведе до зміни відносного руху двох поверхонь за умови сталості зовнішніх параметрів навантаження. Експериментальні дослідження динаміки відносних мікропереміщень, гістерезисних петель та перебігу сил тертя дозволили до існуючих станів номінально-нерухомого фрикційного контакту (зчеплення, змішаний контакт, повне проковзування) додати не менш важливий режим динамічного зчеплення–проковзування.  5. Для реверсивного руху елементів контактної парі з сухим тертям встановлені динамічні співвідношення між параметрами фретингу: коефіцієнтом тертя m, нормальним навантаженням, масою *m*, амплітудою *А,* частотою збурення w, тангенціальною жорсткістю *c*, які визначають стан номінальної нерухомості з’єднання: , . Ці співвідношення узагальнені та представлені діаграмами, які описують той чи інший стан поверхні: зчеплення, проковзування із зупинками, зворотно-поступальний рух. Встановлено, що граничне значення параметра для умови чистого ковзання без зупинок дорівнює 0,607.  6. Розроблена математична модель, що складається з системи диференційних рівнянь, які вперше розглядають “рухомість” тонких поверхневих шарів автономно по відношенню до всієї деталі. Зв’язок поверхневого шару з основним матеріалом моделюється пружним елементом Гука з певною тангенціальною жорсткістю, а контакт з поверхнею - характеристикою тертя, яка задавалась аналітично за результатами обробки експериментальних осцилограм. Відмінністю цієї задачі є те, що рушійною силою динамічного руху в контакті є не гармонічна вимушуюча сила, а наперед невідома функція сили тертя.  7. Розвинута теорія квазістатичного тертя як нестаціонарного процесу переходу від стану попереднього зміщення до проковзування з врахуванням якісних характеристик поверхонь, значень фактичної площі контакту, а також залежностями сил тертя від мікропереміщень та відносних швидкостей.  Теоретично одержані величини максимальних швидкостей відносного руху металевих поверхонь у межах 80…100 мкм*/*с, під час яких відбувається перехід контакту від квазістатичного до кінематичного стану. З урахуванням градієнта поверхні, комплексу умов контактування, параметра пластичності та впливу зростання з’єднань при тангенціальному зсуві, визначена середня величина зміщення поверхонь *D*0, протягом якої зберігається безпосередній контакт між окремими мікронерівностями.  8. Перебіг динамічних характеристик відносного руху контактної пари показав, що збільшення пластичної частки у тангенціальній деформації веде до зменшення амплітуди та швидкостей проковзування до 20 % порівняно з суто пружним контактом. Використовуючи амплітудно-частотну характеристику, для даних умов навантаження знайдений мінімально можливий час перебування контакту у стані зчеплення для металевих поверхонь (*Ф* = 0,01 с). Практично завжди можна уникнути такого співвідношення власної та вимушуючої частоти a, для якої *Ф* = 0,01 с, і тим самим знизити ризик втрати цілісності контакту.  Встановлено, що для співвідношення a = 0,783 між вимушуючою та власною частотою спостерігається мінімальна часова затримка при переході до ковзання і одночасно втрачається вплив параметра пластичності на віброактивність контакту*.*  9. Експериментальні та теоретичні дослідження модельної контактної пари за схемою “кулька–площина” дозволили здійснити комплексний аналіз малоамплітудного фретингу, який полягає у розробленій теорії змішаного контакту та наступного еволюційного підходу до руйнування контактних поверхонь. Досліджений вплив закономірностей тангенціального навантаження на трансформацію співвідношення зон зчеплення та проковзування у плямі контакту. Критичне значення цього співвідношення, при якому можливий перехід у повне проковзування, для стальних поверхонь дорівнює 0,68, титанових сплавів – 0,74, покриттів з твердих сплавів – 0,34.  10. Вирішена контактна задача з частковим проковзуванням. На основі критерію Губера–Мізеса знайдені розподіли еквівалентних максимальних тангенціальних напружень на поверхні та глибині поверхневого шару. Епюри еквівалентних тангенціальних напружень показали не тільки місце ймовірного зародження поверхневих тріщин та траєкторію їх подальшого руху вглиб матеріалу, а й об’єм того поверхневого шару, який сприймає критичні значення напружень.  11. Динаміку режиму зчеплення–проковзування визначає показник , як відношення миттєвої сили тертя до максимально можливої сили статичного тертя. Отримана часова розгортка параметра r(*t*). За умови r(*t*) < 1 – стан зчеплення, при r(*t*) 1 – стан проковзування, де *t* – будь-який фіксований проміжок часу. За допомогою перетворення Фур’є проведений аналіз “щільності” проковзування в однонаправленному русі як частоти набування функцією r(*t*) значення одиниці.  12. Теоретичні розробки, в тому числі й математичне моделювання, були підтверджені експериментальним спостереженням за фретинг-пошкодженнями у плямах контакту Показаний вплив початкових умов контактування на перебіг динамічного руху в контакті ННФЗ, а саме: положення поверхонь, що контактують, відносно центра зони зчеплення та початкових швидкостей. При цьому, відбуваються трансформації фазових портретів, а за ними швидкостей і амплітуди проковзування, які безпосередньо впливають на фретингостійкість.  13. Розвинута теорія адсорбційної активації металевих поверхонь при субмікронних відносних мікропереміщеннях. Експериментально доведено, що навіть при відносних циклічних зміщеннях до 1…2 мкм, локальні області фактичного контакту, можуть бути центрами активного утворення продуктів фретингу. Отримані аналітичні залежності для оцінювання величини мікропереміщень, роботи сил тертя та енергії у зонах проковзування у змішаному контакті. В областях зчеплення, при відповідній кількості циклів навантаження, спостерігається розшарування окремих ділянок поверхні. Встановлено, що сталість зони зчеплення відповідає за сталість динамічних характеристик контакту, а трансформація зони проковзування веде до зміни кількісних характеристик динамічного руху системи, іншими словами до розхитування з’єднання. Кінематичні, динамічні, фрикційні та енергетичні показники фретинг-процесу встановлюють границю малоамплітудного фретингу в межах 10…16 мкм.  14. Проведений комплексний аналіз експериментальних даних з динаміки хаотичних коливань у контактній парі з фретингом. Розроблені програми для обчислення показника Ляпунова за часовим рядом. Теоретичні дослідження показника Ляпунова стосувалися його залежності від виду характеристики тертя. Розроблені методи отримання перерізів Пуанкаре та показників Херста, за якими ідентифікуються передхаотичні та хаотичні коливання в елементах контактних пар з фретингом. Вперше запропонований вейвлет-аналіз часового перебігу фретинг-процесу, який дозволяє безпосередньо під час експлуатації чи експерименту, отримувати важливі якісні та кількісні характеристики стану ННФЗ, а саме, енергетичні параметри режимів зчеплення та проковзування, довготривалі тенденції у зміні контактного стану при експлуатації з’єднань, фіксувати переходи до режимів мікропроковзування, зчеплення–проковзування і повного ковзання, діагностувати вузли та конструкції.  15. Кількісні та якісні характеристики малоамплітудного фретингу знайшли своє повне підтвердження при чисельному моделюванні методом скінченних елементів циклічних тангенціальних навантажень контактної пари “площина–кулька”. Зроблено висновок про те, що найбільш небезпечним, з точки зору номінальної нерухомості контакту і можливого розвитку фретингу, є такий напружено-деформований стан, для якого можливі відносні зміщення поверхонь у 2…6 мкм.  16. Ефективним способом підвищення довготривалої цілісності ННФЗ для конструкційних сталей і сплавів є комбінована обробка поверхонь електроіскровим легуванням твердими сплавами з наступним лазерним опромінюванням. Відповідна щільність покриття поверхні лазерним опромінюванням створювала комірки різних розмірів, що призводило до армування поверхні. Товщина модифікованого шару з мікрооплавленням не перевищувала 5…15 мкм. Такі заходи зменшують віброактивність ННФЗ на 35…50 % і збільшують фретингостійкість контакту у 1,5…4 рази. | |