метр. При цьому процес зносу розглядається як адитивний результат, який за своєю природою є органічно випадковим, але характеризується певними закономірностями.

Ґрунтуючись на фундаментальних положеннях структурно-енергетичної концепції, кінетична теорія фазових перетворень стосовно до задач трибології органічно відображає науковий дуалізм цих підходів, пов'язуючи уявлення про органічно випадковий характер явища зношування, закономірні взаємозв’язки між зношуванням і параметрами, що його визначають [1].

При навантаженні тертям кристалічні структури багатьох металів зі зміною поверхневої температури і флуктуаціями температурних спалахів, які виникають на фактичних плямах фрикційних контактів, стають термодинамічно нестійкими І переходять у нові, більш стійкі модифікації

Перебудова кристалічних грат, що виникає при переході з однієї модифікації до іншої, супроводжується різкими змінами структури і будови поверхневих шарів, носить локальний характер, обумовлений розмірами плям фактичного контакту. При цьому малі розміри цих плям та незначність сумарної площі їх поверхні є причиною значних фізичних тисків, які супроводжуються аномальними спалахами напружень, деформацій і температур. Підтвердженням цього є не безперервна монотонна зміна фазового складу поверхневої структури в контактній зоні і прилеглих мікрооб’ємах, а дискретний характер розподілення, що обумовлений аномальним прискоренням дифузійних і топохімічних процесів, які ініціюються на локальних ділянках плям фактичного контакту.

Важливою особливістю, що характеризує їх кінетику, є швидкості нагрівання та охолодження. Як показали дослідження, при ковзанні за час існування контакту (10' *10" с) відбувається нагрівання мікрооб’ємів на фрикційній плямі до температур 10 °С, а після виходу - різке охолодження зі швидкістю ~103*104 °С/с, у результаті чого реалізуються умови для локальних структурних перетворень, які супроводжуються фазовим наклепом. Фазовий наклеп відрізняється багатократністю деформацій. При цьому деформація виникає від кожної неодночасно взаємодіючої одиничної плями фактичного контакту і є в кінцевому рахунку рушійною силою процесів поверхневого та приповерхневого руйнування і трищіноутворення матеріалів пар тертя.

Сучасна теорія міцності твердих тіл розглядає спільно вплив термічних та механічних факторів на вірогідність флуктуації, яка призводить до руйнування. Стосовно зношування термоактиваційний механізм руйнування матеріалів підтверджується останніми дослідженнями [2; 3]. Поверхнева міцність та опір зношуванню різних триботехнічних матеріалів залежить від тривалості їх перебування в напруженому стані, тобто від дії контактної пружнопластичної деформації, яка є основним активуючим фактором. Часова залежність опору зносу обумовлена явищем структурної пристосовуваності матеріалів.

Отже, процес руйнування не є миттєвим. Остаточному руйнуванню передує поступовий розвиток і накопичування різних дефектів в напруженому стані матеріалу, що навантажений тертям. Цей процес інваріантний відносно вихідних властивостей матеріалів, однак швидкість його тим менша, чим менше напруження і нижче температура. Таким чином, на мікрорівні руйнування локальних ділянок поверхонь тертя і утворення продуктів зношування відбувається внаслідок багатократного контактування фрикційних плям, взаємодія яких випадкова, і їхня мікрогеометрія може бути описана тільки за допомогою функцій розподілення ділянок поверхні за висотою опорними кривими [4].

З іншого боку, на мікрорівні реальні умови експлуатації характеризуються заданими значеннями зовнішніх параметрів, що визначають як закономірності процесів, так і надійність триботехнічної системи в цілому.

Викладений концептуальний підхід дозволяє отримати аналітичні співвідношення, які зв’язують інтенсивність зношування з фізико-механічними властивостями матеріалів [1; 3; 5]. При цьому для випадку пружного контакту розрахунок зношування зводиться до аналітичного виразу:

$$I_h = C_1 \frac{(1-\mu^2)}{E} q_a \left[\frac{kfq_c}{c_2 \sigma_0} \left(\frac{E}{[1-\mu^2] q_c} \right)^{1-\beta} \right]^t$$

де c_1, c_2, β – константи мікрогеометрії; μ – коефіцієнт Пуассона; E – модуль Юнга; q_a, q_c – тиск нормальний, контурний відповідно; f – коефіцієнт тертя; K – коефіцієнт приведення напружень; σ_0 – міцність.

Аналіз наведеного рівняння дозволяє дослідити вплив різних факторів на інтенсивність зношування в умовах пружного контакту, наприклад, для випадку контактування жорстких поверхонь, одна з яких є пружно-деформованою, а друга абсолютно жорсткою.

Навантаження нелінійно впливає на інтенсивність зношування:

$$I_k = q_c^{1+\beta t}.$$

Указана залежність узгоджується з експериментальними даними. Коефіцієнт тертя значно впливає на знос $I_n \sim f^t$. Однак взаємозв'язок зношування з коефіцієнтом тертя не однозначний. Указана закономірність дозволяє пояснити ряд експериментальних фактів, у першу чергу, ефективність мастила як засобу, що знижує величину зносу. Ця закономірність пов'язана також з температурною залежністю зносу. Так, при зміні температури тертя, поряд зі зміною пружно-міцносних властивостей матеріалів пар тертя, змінюється коефіцієнт тертя.

Для матеріалів з однаковою міцністю σ_o інтенсивність зносу збільшується з підвищенням модуля Юнга E:

$$I_n = E^{t-\beta t-1},$$

а для матеріалів з однаковим розривним подовженням ε_o інтенсивність зносу зменшується з підвищенням модуля пружності. Профіль кривої залежності зносу від модуля пружності є характерним для крихких матеріалів, ця залежність, як і зв'язок з фрикційними властивостями матеріалів, не строго однозначна.

Міцнісні властивості матеріалів (σ_o, E, μ) позитивно впливають на знос. Залежності зносу від міцносних властивостей, що спостерігаються експериментально, задовільно описуються аналітично, але вони не однозначні, а мають статистичний характер. Вплив температури на процеси зношування обумовлено як зміною пружно-міцнісних та фрикційних властивостей матеріалів пар тертя, так і інтенсифікацією термоокислювальних реакцій. Швидкість відносного ковзання впливає на знос через температуру тертя. І вплив обумовлюється тим, що швидкість мікродеформацій на контакті безпосередньо пов'язана зі швидкістю ковзання.

Отже, для даного випадку величина зносу і характер його залежності від зовнішніх факторів визначаються пружно-міцнісними та фрикційними властивостями матеріалів з урахуванням температурно-часових залежностей.

Вибір підходу до аналізу процесу зношування визначається кінцевою метою дослідження. Якщо вона полягає у визначенні якісної картини зносу, виявленні його фізичних основ або порівняльній оцінці умов тертя, то логічно уявити знос як детермінований процес. Однак такий підхід неприйнятний при розрахунку надійності пар тертя. У цьому випадку необхідно вирахувати ймовірність безвідмовної роботи пари тертя впродовж заданого часу. Імовірність може бути підрахована лише на основі ймовірнісних закономірностей зношування. Загальні закономірності процесу характеризуються невипадковими функціями часу. Однією з таких невипадкових функцій є математичне очікування випадкового процесу. Таким чином, подати зношування у вигляді детермінованого процесу означає проаналізувати поведінку його математичного сподівання. При розрахунку надійності, окрім математичного сподівання процесу, необхідно вивчити й інші його ймовірнісні характеристики, такі, як дисперсія, кореляційна функція тощо.

Список літератури

1. *Поверхностная* прочность материалов при трении / Б.И. Костецький, И.Г. Носовский, А.К. Караулов и др. – К.: Техніка, 1978. – 259 с.

2. *Костецкий Б.И., Колисниченко Н.Ф.* Качество поверхности и трение в машинах. – К.: Техніка, 1979. – 216 с.

3. *Бакли Д.* Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. – М.: Машиностроение, 1986. – 360 с.

4. *Крагельский И.В., Михин Н.М.* Узлы трения машин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

5. *Крагельский И.В.* Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1978. – 480 с.

Стаття надійшла до редакції 20.03.02.

УДК 629.7.063+621.793/043/

Є.Ю. Євсюков , асист.

ОЦІНКА РІВНЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ДЕТОНАЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ

Розглянуто закономірності розподілення залишкових напружень та їх вплив на зносостійкість покриттів, подано рекомендації щодо їх зниження.

Поверхневе руйнування покриттів відбувається під впливом не тільки напружень, що обумовлені процесом пружно-пластичної деформації та активації поверхневого шару при навантаженні тертям, але і технологічних залишкових напружень, що виникають у покриттях при їх напиленні. Рівень залишкових напружень, їх розподілення та знак є в багатьох випадках важливими параметрами, що визначають якість покриттів.

Незважаючи на формальну ясність основних фізичних процесів, що викликають залишкові напруження у напилених покриттях, на цей час використання кількісних залежностей їх розрахунку повною мірою неможливо через велику кількість припущень, наслідком яких є неточність обчислювань. У працях, які присвячені характеристикам детонаційних покриттів, доволі обмежені відомості про технологічні залишкові напруження, які розкривають якісні залежності зносостійкості, відсутні дані про вплив термічної обробки на їхні величини та розподілення.

Використаний метод вивчення технологічних залишкових напружень дозволяє визначити характер їхнього розподілення, величину та глибину залягання, записати зміни стріли вигину плоского зразка у процесі безперервного витравлення напиленого шару [1].

Залишкові напруження, що досліджуються, значно змінюються в межах поверхневих шарів, і для досягнення точності необхідне послідовне видалення тонких шарів. Безпосередньо з експерименту отримано ряд значень стріли вигину $f_1, f_2, f_3, ..., f_n$, які відповідають різним товщинам шарів, що знімаються, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, ..., \alpha_n$, та визначено значення функції $f(\alpha)$, її похідної та інтегралу в розрахункових перетинах. З математичного погляду це являє собою відому задачу теорії наближених обчислювань при використанні параболічної апроксимації. Величина залишкових напружень розраховувалася згідно з методами вимірювання, які викладені у роботі [2], з урахуванням специфіки покриттів, що досліджувалися.

У результаті досліджень були визначені та проаналізовані розподілення залишкових напружень за товщиною композиційних покриттів на основі Cr_3C_2, WC, Al_2O_3, а також Ni та Fe (рис. 1).

Характер розподілення напружень за товщиною залежить від матеріалів: в одних переважають напруження стиснення, в інших – розтягнення зі значним зближенням в абсолютних значеннях.

Найсприятливіше розподілення з погляду експлуатаційних властивостей мають карбідні покриття.