

ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИЛОВИХ ВПЛИВІВ В ПОВЕРХНЕВИХ ШАРАХ ТРИБОСПРЯЖЕНЬ

Національний авіаційний університет, akvarobotec@narod.ru

Розглянуто метод числового дослідження напружено-деформованого стану поверхневого шару трибоспряження у його пружному деформуванні під впливом навантажень різного характеру.

Вступ. Ресурс багатьох машин зумовлений низькою зносостійкістю рухомих спряжень та деталей вузлів тертя. Для забезпечення їх виготовлення на сучасному рівні необхідні, перш за все, спеціалізовані знання моделювання, конструювання, виробництва та експлуатації таких систем. Для задач триботехніки особливе значення мають методи оцінки процесів та явищ через модельний експеримент. Використання методів моделювання при правильному та об'єктивному підході до узагальнення результатів з оцінкою їх достовірності та точності, дозволяють значно прискорити впровадження нових технічних рішень і скоротити трудові витрати та витрати дефіцитних матеріалів. З різноманітних вузлів триботехнічного призначення, які використовують у загальному машинобудуванні, найбільш масовими та відповідальними є вузли ковзання, вони ж і узагальнюють поняття трибологічних спряжень взагалі. Аналіз інформації, присвяченої моделюванню, показав, що створення розрахунково-експериментальних методів визначення триботехнічних характеристик спряжень стало назрілою необхідністю.

Аналіз сучасних досліджень. Основи сучасних уявлень про тертя були закладені в 20 столітті такими вченими як І. В. Крагельский [1], Ф. Боуден і Д. Тейбор [2], які значно розширили уявлення про тертя, сформулювавши молекулярно-механічну й адгезійно-деформаційну теорії тертя. Наступним етапом розвитку науки про тертя стало усвідомлення провідної ролі поверхневих шарів матеріалу. Розуміння особливої ролі поверхневого шару обумовлює інтерес трибологів до його дослідження. Значний внесок у вивчення структури й властивостей поверхневих шарів і побудови моделей

фрикційного контакту внесли роботи Л.М. [3], Д. Ригни [4], В.І. Владимірова [5] і ін. В останні роки активно розвивається підхід до дослідження деформаційних процесів у поверхневих шарах, заснований на концепції структурних рівнів деформації й руйнування твердих тіл академіка В.Е. Панина [6], а також на розумінні в рамках цієї концепції особливої ролі поверхні й поверхневих шарів у зародженні й розвитку пластичної деформації.

Незважаючи на постійний розвиток експериментальних методів матеріалознавства, зона тертя й особливо зона фактичного контакту залишаються важкодоступними для дослідження безпосередньо в процесі випробування. Звичайно, інформація, одержувана під час експерименту, обмежується величиною коефіцієнта тертя, температурою на деякій відстані від поверхні й іноді на самій поверхні. При деяких видах випробувань на тертя можна також вимірювати лінійне зношування по зміні розміру зразка. Усі інші дані - про структурний і фазовий склад, зміну фізико-механічних властивостей матеріалу, ступені деформації, хімічних перетвореннях приповерхніх шарів, явищах переносу й механічного перемішування, як правило, можуть бути отримані тільки після завершення експерименту або в якій-небудь проміжний момент після зупинки випробування. У цьому випадку дослідник спостерігає лише наслідки явищ і процесів, що протікали в трибосистемі. Крім того, деякі процеси, які йдуть безпосередньо в момент випробування й для протікання яких необхідна висока температура, більші напруження й деформації можуть взагалі залишитися непоміченими, тому що в момент спостереження відсутні умови для їхнього протікання. І, навпаки, у ряді випадків після закінчення експерименту в трибосопряженні виявляються зміни, які відбулися не в процесі самого випробування, а з'явилися лише наслідком його припинення.

Очевидним виходом з описаної ситуації може стати комп'ютерне моделювання процесів тертя й зношування. Результати, отримані в процесі моделювання, можуть скласти основу прогнозування поведінки матеріалів при контактних взаємодіях і забезпечити надалі вдосконалення триботехнічних матеріалів.

Методика досліджень. Напружений стан у зоні фактичного торкання тіл характеризується деформацією мікронерівностей поверхонь, а також пружними або пластичними деформаціями. Таким

чином, поверхневий шар можна розглядати як деформівне, геометрично нелінійне тверде тіло [1]. При цьому геометрією поверхні може бути як окружність, так і деяка інша форма кривої, наприклад, еліпс із незначним співвідношенням осей тощо, яка виникла внаслідок зношування поверхонь тертя або зумовлена технологічними параметрами. При оцінці взаємодії контактуючих твердих тіл мікронерівності реальної поверхні моделюють у вигляді однакового розміру тіл правильної геометричної форми, що розташовані на деякій основі й розподілені за певною залежністю по висоті. Бувають наступні основні види відхилень поверхонь [1]: макровідхилення (рис. 1, крива 1), хвилястість (рис. 1, крива 2), шорсткість (рис. 1, крива 3).

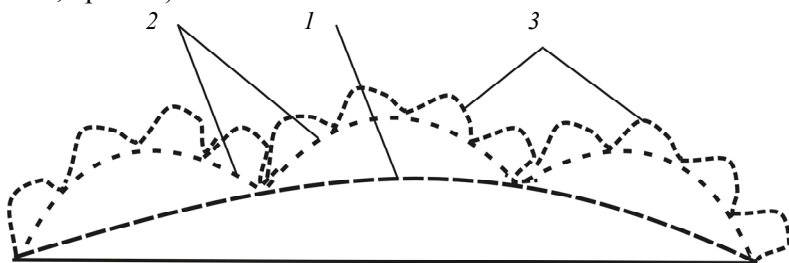


Рис. 1. Схема поверхні твердого тіла: 1 – макровідхилення; 2 – хвилястість; 3 – шорсткість [1]

Кривою опорної поверхні є геометрична характеристика, що не враховує процесів деформування мікронерівностей [1]. Очевидна складність аналізу цих процесів у їх аналітичному або експериментальному методах досліджень, що вимагають значних часових витрат. Розв'язання таких задач виявляється можливим тільки сучасними чисельними методами нелінійного аналізу, застосування яких спонукає до вибору модифікації розв'язальних рівнянь, що забезпечують алгоритмічність і ефективність використовуваних підходів. Пропонується метод числового моделювання силових впливів у поверхневих шарах трибоспряжень нерівностей, що викликають пружне деформування. Метод засновано на розв'язанні звичайних диференціальних рівнянь високого порядку (до двадцяти трьох), що можуть описувати нелінійне просторове деформування пружного твердого тіла, визначати втрату стійкості фізичного процесу, будувати рівноважні стани після біфуркаційної втрати стійкості [7].

При цьому представляється дія довільного вектора статичних або квазістатичних зосереджених, розподілених або моментових навантажень, що як завгодно можуть бути розташовані постійно або дискретно у площині (або, при необхідності, у просторі) взаємного обертання трибоспряжень. Окрім того, дія цих сил може бути прикладена або знята у часовому процесі деформування. Як результат можуть бути одержані характеристики напружено-деформівного стану мікронерівностей, їх вплив на процес тертя та зношування об'єкту. Геометрична форма контактуючих поверхонь може бути задана або аналітично, або за допомогою чисельної функції, що одержується обчислювальними методами.

Розглянемо як приклад схеми можливих навантажень при числовому дослідженні вищесказаних процесів (рис. 2). На цьому рисунку показано дискретну ділянку окружності, на яку можуть діяти різні навантаження: функціонально розподілене навантаження (рис. 2, а); зосереджені зусилля, що постійні за напрямом (рис. 2, б); зосереджені зусилля, що слідкують за переміщенням перерізу (рис. 2, в); зосереджені моменти (рис. 2, з); загальний вектор навантажень (рис. 2, д); зусилля, що прикладаються за часом (квазістатичні), (рис. 2, е).

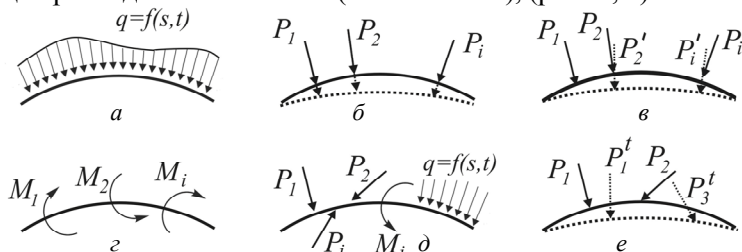


Рис. 2. Схеми можливих навантажень при числовому дослідженні дискретної ділянки опорної поверхні

Для задавання цих навантажень на дискретну ділянку трибоспряження або на трибоспряження в його агрегатному стані необхідно враховувати наступне [7]. Проекції локальних похідних векторів зусиль і моментів F і M на осі головного тригранника можна представити в вигляді

$$\left(\frac{dF}{ds} \right)_n = \frac{dF_u}{ds}, \dots, \left(\frac{dM}{ds} \right)_n = \frac{dM_u}{ds}, \quad (1)$$

де s – незалежна змінна за диференціюванням.

Проектуючи з урахуванням цієї рівності ліві і праві частини співвідношень на осі u , v , w отримуємо шість скалярних рівнянь рівноваги сил і три скалярних рівняння рівноваги моментів.

У випадку, коли прикладена зберігаюча в просторі напрям зовнішня сила P з компонентами P_x , P_y , P_z за допомогою відповідних матриць переходу F_u , F_v , F_w потрібно виразити через P_x , P_y , P_z .

Якщо прикладено зовнішній момент M з компонентами M_x , M_y , M_z то граничні рівняння відносно кривизн p , q , r запишуться в формі

$$\begin{aligned} p &= p_0 + 1/A \left[\begin{aligned} &(M_x n_x + M_y n_y + M_z n_z) q / \sqrt{p^2 + q^2} + \\ &+ (M_x b_x + M_y b_y + M_z b_z) p / \sqrt{p^2 + q^2} \end{aligned} \right], \\ q &= q_0 + 1/B \left[\begin{aligned} &(M_x n_x + M_y n_y + M_z n_z) p / \sqrt{p^2 + q^2} + \\ &+ (M_x b_x + M_y b_y + M_z b_z) q / \sqrt{p^2 + q^2} \end{aligned} \right], \\ r &= r_0 + 1/C (M_x \tau_x + M_y \tau_y + M_z \tau_z). \end{aligned} \quad (2)$$

Комбінацією рівнянь (1) – (2) можна описати і інші, не охоплені вище, умови. Розглянемо тепер умови розриву функцій F_u , F_v , F_w у випадку, коли зосереджена зовнішня сила P прикладена в точці $s = s^P$. Оскільки похідні від функцій F_u , F_v , F_w по s в цій точці не існують, рівняннями (6) можна скористатися в проміжках $0 < s < s^P$, $s^P < s < S$, а в точці $s = s^P$ – умовами сполучення

$$\begin{aligned} F_u(s_+^P) - F_u(s_-^P) &= P_u, \quad F_v(s_+^P) - F_v(s_-^P) = P_v, \\ F_w(s_+^P) - F_w(s_-^P) &= P_w. \end{aligned} \quad (3)$$

Якщо діє сила, що не змінює свого напрямку і задана компонентами P_x , P_y , P_z , рівняння (3) слід замінювати співвідношеннями

$$\begin{aligned} F_u(s_+^P) - F_u(s_-^P) &= (P_x n_x + P_y n_y + P_z n_z) q / \sqrt{p^2 + q^2} + \\ &+ (P_x b_x + P_y b_y + P_z b_z) p / \sqrt{p^2 + q^2}, \\ F_v(s_+^P) - F_v(s_-^P) &= - (P_x n_x + P_y n_y + P_z n_z) p / \sqrt{p^2 + q^2} + \\ &+ (P_x b_x + P_y b_y + P_z b_z) q / \sqrt{p^2 + q^2}, \\ F_w(s_+^P) - F_w(s_-^P) &= P_x \tau_x + P_y \tau_y + P_z \tau_z. \end{aligned}$$

Аналогічно формулюються умови розриву функцій p, q, r в точці додатку зовнішнього моменту $M^{\text{зн}}$:

$$\begin{aligned} p(s_+^M) - p(s_-^M) &= M_u^{\text{зн}} / A, \\ q(s_+^M) - q(s_-^M) &= M_v^{\text{зн}} / B, \\ r(s_+^M) - r(s_-^M) &= M_w^{\text{зн}} / C. \end{aligned}$$

При реальному силовому впливі зосереджене навантаження не може бути суворо прикладено в якій не будь точці, тобто її дія розповсюджується на деякій дільниці ds інтервалу $0 \leq s \leq l$. У цьому випадку, задавши умову, при якій параметр навантаження $\lambda = f(s)$, можна прикласти навантаження будь-якої інтенсивності на одному або декількох дільницях інтегрування. При цьому для досягнення безперервності функції навантаження прикладаються не стрибкоподібно, а плавно, змінюючись на дільницях $0 \leq \lambda_H \leq \lambda$ і $0 \leq \lambda_K \leq \lambda$, де λ_H і λ_K мінімально допустимі для збіжності обчислювального процесу значення параметра навантаження на початковому і кінцевому дільницях відповідно. Функція переходу від λ_H до λ і від λ до λ_K , як правило, лінійна, але при необхідності, якщо потрібний додаток зосередженого навантаження на досить малій дільниці, вона може бути нелінійною (наприклад, експонентною). Схематично ці методи показані на рис. 3. Величина зосередженого навантаження в цих випадках визначається відомими методами, тобто, в першому випадку (рис. 3, а) $P = \lambda_H ds_H + \lambda_K ds_K + \lambda ds$, в другому (рис. 3, б) – $P = \int \lambda ds$.

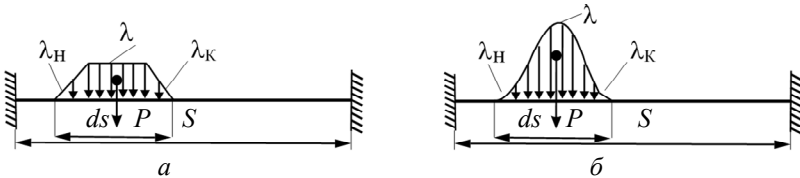


Рис. 3. Способи представлення зосередженого навантаження лінійною (а) і нелінійною (б) функціями

Таким чином, використовуючи розроблену методику, можна задавати довільні навантаження як за характером дії, так і за напрямом у будь-якій точці розглядаємого об'єкта.

Отримані результати. Для дослідження поверхонь трибосприяжень необхідно в першу чергу одержати геометрію об'єкта в агрегатному або у локальному стані. Якщо вважати, що в початковому стані досліджуваний елемент знаходиться в рівновазі, то внаслідок додатку навантажень він деформується, приймаючи просторову форму подовжньої осі, що значно відрізняється від первинної. На рис. 4, *a* показано геометрію опорної поверхні в аксонометричному зображенні, одержану чисельним розрахунком. Слід зазначити, що у наведеному прикладі задача розглядалася у плоскій постановці. Розв'язуючи чисельно задачу деформування під дією навантажень, зображених на рис. 2, *d*, одержано геометрію деформованого стану опорної поверхні (рис. 4, *б*).

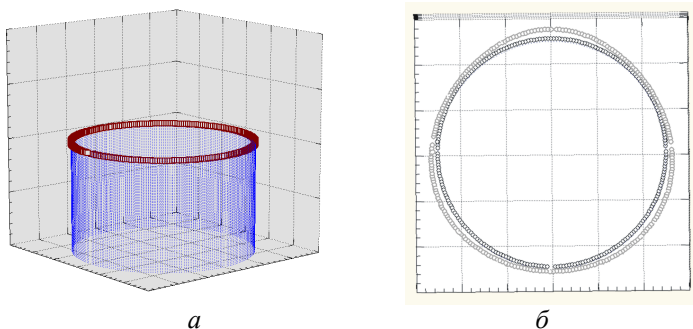


Рис. 4. Геометрія досліджуваного об'єкту (*a* – у аксонометричному зображенні) та його деформований стан (*б* – у площині)

Досліджуючи таким чином деформівний елемент, можна визначити будь-які показники напружено-деформованого стану на будь-якому етапі деформування як для окремого перерізу, так і у агрегатному стані. На рис. 5 як приклад показано у безрозмірних величинах значення поперечних зусиль (рис. 5, *a*) у окремому перерізі та згинальних моментів (рис. 5, *б*) у агрегатному стані.

Для числового розв'язку такої задачі задається 250 точок дискретизації. При цьому проводиться покрокове (100–200) інтегрування з дискретним навантаженням, а діючі навантаження – аналоги параметра $\lambda = f(s)$. Достовірність розрахунків побічно визначається збіжністю рішень диференціальних рівнянь і крім того відображається на геометричній логічності графічного відображення результатів.

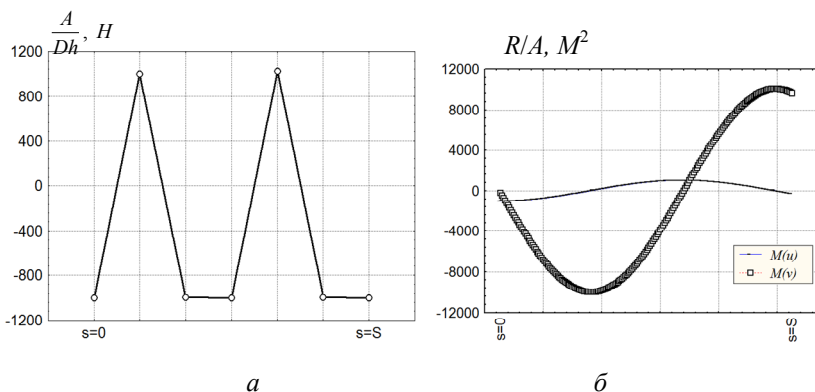


Рис. 5. Зусилля H (а) та моменти M (б) у довільному перерізі опорної поверхні у безрозмірних величинах

Висновки. Застосовуючи запропоновану методику, можна без значної перебудови обчислювальних алгоритмів міняти характер дії навантажень, одержувати необхідні параметри напружено-деформованого стану трибоспряжень. При деяких раптово виникаючих умовах навантаження (наприклад, при раптовому додатку будь-якого навантаження, втраті стійкості, зміні жорсткості унаслідок зносу тощо) можна припинити рішення і після зміни певних параметрів задачі відновити його знову, починаючи з перерваного кроку. Запропонований алгоритм передбачає можливість зміни дії навантаження на будь-якому кроці числового інтегрування через «запам'ятовування» попереднього кроку, а також на будь-якому інтервалі сукупності точок дискретизації. Простота використання, наочність, швидкість отримання результатів роблять методику зручною для використання інженерами при розрахунках і в технологічних операціях.

Список літератури

1. Крагельский И. В., Узлы трения машин: Справочник / И. В. Крагельский, Н. М. Михин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
2. Боуден Ф. П., Трение и смазка твердых тел / Ф. П. Боуден, Д. М. Тейбор. – М.: Машгиз, 1960. – 542 с.
3. Рыбакова Л.М. Исследование структуры тонкого поверхностного слоя деформированного металла / Л. М. Рыбакова // Физика и химия обработки металлов. — 1975. –№1. –С. 104–109.

4. Ригни Д. Процессы изнашивания при трении скольжения / Д. Ригни // Трение и износ.–1987.–№8.–С. 17–22.

5. Владимиров В.И. Проблемы физики трения и изнашивания / В. И. Владимиров // Физика износостойкости поверхности металлов. Ленинград: ФТИ РАН, 1988. – С. 8–41.

6. Панин В.Е. Поверхностные слои нагруженных твердых тел как мезоскопический структурный уровень деформации / В. Е. Панин // Физ. мезомех. 2001. – Т.4.– №3. –С. 5–22.

7. Кравцов В.И. Расчет опорных нагрузок гибкого вала при его сложном упругом движении / В. И. Кравцов, А. Н. Недбайло // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. –К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2010. –Вип. 52. –С. 102–113.

Кравцов В. И., Садеги М.Д.-А. Числовое моделирование силовых влияний в поверхностных слоях трибосопряжений // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2012. Вип. 58. – С.17–25.

Рассмотрен метод числового исследования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя трибосопряжения при его упругом деформировании под влиянием нагрузок разного характера.

Рис. 5, список лит.: 7 наим.

Kravtsov V., Sadeghi M.D.-A. Numerical modeling of power influences on friction units surface layers

The method of numerical research intensify the deformed condition of a blanket of rubbing details in its elastic deformation under the influence of loadings of different character is considered.

Стаття надійшла до редакції 23.10.2012