

УДК 621.78(043.2)

А. М. САДЕГІДЖАЛАЛ

Національний авіаційний університет, Україна

## ВРАХУВАННЯ ЗМІНИ ПРОФІЛЮ ШОРСТКОСТІ ПРИ ПРУЖНОМУ ДЕФОРМУВАННІ НЕРІВНОСТЕЙ

*Розглянуто метод числового дослідження напружено-деформованого стану поверхневого шару трибоспряження у його пружному деформуванні під впливом навантажень різного характеру з урахуванням змінюваних параметрів шорсткості контактуючих поверхонь.*

**Ключові слова:** шорсткість, тертя, опорна поверхня, числове дослідження, напружено-деформований стан, трибоспряження, навантаження.

**Вступ.** Для задач триботехніки використання методів математичного 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. Первинною проблемою при вивченні тертя є контактування дотичних поверхонь. У поняття контактування входить взаємодія поверхонь, що належать твердим тілам, під дією відносного зсуву й стискаючих сил з урахуванням їх відхилення від ідеальної форми й впливу середовища (гази й мастильні матеріали), що є у зоні контакту. Оскільки поверхні деталей мають шорсткість і хвилястість, що обумовлені технологічною обробкою, а також тертям і зношуванням, то контакт деталей, що сполучаються, є дискретним і площа торкання становить незначну частину від номінальної площі. Усі реальні деталі мають контакт поверхонь на площі, яка становить усього 5–10 % і лише іноді доходить до 25 % від номінальної. Подальший розвиток теорії контактної взаємодії поверхонь тертя дозволить управляти процесами фрикційної взаємодії деталей стосовно до конкретних умов їх роботи, передбачити величину зношування, а також підвищити їхню зносостійкість.

**Аналіз сучасних досліджень.** Внесок у вивчення структури й властивостей поверхневих шарів і побудови моделей фрикційного контакту внесли роботи Л. М. Рибакіної [1], Д. Ригні [2], В. І. Владимірова [3] 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. Паніна [4], 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 коефіціє-

ента 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 чисельного аналізу, можуть скласти основу прогнозування поведінки матеріалів при контактних взаємодіях і забезпечити надалі вдосконалювання триботехнічних матеріалів.

**Мета роботи.** На підставі вищесказаного можна зробити висновок, що при дослідженні пружного контактування трибосопряжень необхідно мати чітке уявлення про геометрію кривих, що мають місце у цьому процесі. Метою роботи є розроблення методики задавання геометрії трибосопряження при числовому дослідженні його напружено-деформованого стану з урахуванням зміни геометрії за рахунок пластичного деформування нерівностей при обробці.

**Виклад основного матеріалу.** 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 [5]. 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. При аналізі кривої опорної поверхні, як правило, не враховують процесів деформування мікронерівностей [5]. Однак насправді їх величина в процесі багаторазових контактних взаємодій може значно відрізнятись від їхніх вихідних значень. Виходячи із цього впливає завдання розрахунків зміни вихідних параметрів шорсткості контактуючих поверхонь після додавання навантаження. Однак їх аналіз при зміні фізико-геометричних параметрів трибосопряження викликає значні труднощі обчислювального характеру. Це спонукає до створення сучасних методів числового аналізу поверхонь тертя, що дозволять алгоритмічно визначати необхідні параметри напружено-деформованого стану поверхонь тертя в залежності, зокрема, і від параметрів шорсткості.

Розглянемо визначення параметрів шорсткості при контактуванні робочих поверхонь. Нехай висотні характеристики взаємодіючої поверхні настільки незначні, що ними можна знехтувати [6]. У цьому випадку сформовану поверхню можна розглядати як поверхню з масляними кишнями, сформовану методом пластичного деформування при зміцнювальній обробці, а параметрами шорсткості між масляними кишнями знехтувати [3]. Позначимо величини шорсткості

ті, прийняті за ГОСТ 2789-73 для вихідної шорсткості опорної поверхні  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ,  $S_m$ ,  $t_p$ ; поверхні взаємодії  $R_{a1}$ ,  $R_{p1}$ ,  $R_{z1}$ ,  $R_{max1}$ ,  $S_{m1}$ ,  $t_{p1}$ ; знову сформованого профілю  $R_a^f$ ,  $R_p^f$ ,  $R_z^f$ ,  $R_{max}^f$ ,  $S_m^f$ ,  $t_p^f$ . Виділимо елементарну поверхню, що має ширину, що дорівнює кроку поздовжньої, а довжину - кроку поперечної шорсткості

$$S_m^{noz} = \frac{l_{noz}}{n_{noz}}, \quad S_m^{non} = \frac{l_{non}}{n_{non}},$$

де  $l_{noz}$ ,  $l_{non}$  – базова довжина, відповідно, у поздовжньому й поперечному напрямках;  $n_{noz}$ ,  $n_{non}$  – кількість виступів, відповідно, у поздовжньому й поперечному напрямках. Обсяг масляних кишень займані поверхні рівний [6]

$$V_{м.к.} = A_H R_p^f \left( \frac{t_0}{100} \right),$$

де  $A_H$  – номінальна площа поверхні без урахування масляних кишень;  $t_0$  – відносна площа, що займана масляними кишнями при зміцнювальній обробці, визначеною з рівняння [6]

$$t_0 = 50 \left( \frac{R_{max} - Y}{R_{max} - R_p} \right)^{\left( 5 - \frac{R_p}{R_a} \right)},$$

де  $Y$  – відстань від лінії виступів до розглянутого профілю.

Вихідна шорсткість найбільш близько моделюється у вигляді еліптичного параболоїда, обсяг якого рівний

$$V_1 = 0,5 \pi a c R_{max}.$$

Вважаючи, що в результаті деформації взаємодіяє увесь елементарний об'єм, можна записати рівняння для визначення об'єму западини

$$V_{зан} = V_2 - V_1 - V_3, \quad V_2 = 4ac(R_{max} - Y), \quad V_3 = \frac{V_H \int_0^Y F(h) dh}{V_1}.$$

Максимальна величина знову сформованого профілю рівна

$$R_{max}^f = R_{max} - Y.$$

Величини  $R_a^f$  і  $R_z^f$  з достатньою точністю можна визначити із співвідношень [6]:

$$R_a^f = 0,2 R_{max}, \quad R_z^f = 0,87 R_{max}.$$

Відносну довжину опорної лінії профілю шорсткості на будь-якому рівні визначають залежністю [3]:

$$t_p^f = 100 - 45 \left( \frac{R_{max}^f - Y}{R_{max}^f - R_p^f} \right)^{\left( 4,5 - 0,9 \frac{R_p^f}{R_a^f} \right)}.$$

Зміна кроку відбувається за рахунок того, що при формуванні нового профілю змінюється положення рівня середньої лінії. Цей рівень можна провести на вихідному профілі, відступивши від вершини максимально виступаючої нерівності на величину

$$e^f = R_{max} - Y - R_p^f.$$

Враховуючи, що в еліптичному параболоїді параметри  $S_m^f$  і  $a^f$  рівні, величина  $t_p$  прийме значення

$$t_p = 100 - t_m \left( \frac{R_{max} - Y - R_p^f}{R_{max} - R_p} \right)^{\frac{50 R_z - t_m R_a}{50 R_a}}$$

Після виконання перетворень можна одержати вираження для визначення середнього кроку нерівностей знову сформованого профілю

$$S_m^f = 2 S_m \frac{t_m}{t_m^f} \left[ 1 - \frac{t_m}{100} \left( \frac{R_{max} - Y - R_p^f}{R_{max} - R_p} \right)^{\frac{50 R_z - t_m R_a}{50 R_a}} \right]$$

Таким чином, використовуючи отримані залежності, на підставі розрахункових значень пластичних деформацій, обумовлених з теорії контактної взаємодії, з'являється можливість прогнозування параметрів шорсткості після одного або декількох навантажень. На відміну від змодельованого об'єму при стиску реальної шорсткості в початковий період не відбувається пластичного деформування основного матеріалу, а після настання насичення відсутнє деформування шорсткості й відбувається деформування лише основного матеріалу.

Для числової реалізації запропонованого аналізу шорсткості поверхонь тертя використовується алгоритм, що описаний в [7]. Математична модель базується на відомих підходах Лагранжа й Ейлера, які описують рівновагу й деформування елемента пружного об'єкта, його зовнішню й внутрішню геометрію.

Числове розв'язання рівнянь високого порядку, що описують напружено-деформований стан трибоспряження, як у одній площині, так і у просторі, здійснюється методом продовження за параметром. При цьому є можливість представити дію довільного вектора статичних або квазістатичних зосереджених, розподілених або моментових навантажень, що як завгодно розташовані у площині (або, при необхідності, у просторі) у трибоспряженні. Як результат одержуються характеристики напружено-деформованого стану мікронерівностей або опорної поверхні. Геометрична форма контактуючих поверхонь може бути задана або аналітично, або за допомогою чисельної функції, спираючись однак на відомі аналітичні залежності. Методика відрізняється алгоритмічністю і простотою перебудови підходів для розв'язань конкретних задач. Процеси, що виникають у контактних поверхнях трибоспряження можуть бути відображені на екрані дисплея у реальному часі та одержані у графічному вигляді графіками, таблицями або рисунками.

**Висновки.** Застосовуючи запроповану методику, можна без значної перебудови обчислювальних алгоритмів міняти характер дії навантажень, одержувати необхідні параметри напружено-деформованого стану трибоспряжень в залежності від змінюваної за рахунок деформації геометрії контактних поверхонь. При деяких раптово виникаючих умовах навантаження (наприклад, при додатку будь-якого навантаження, втраті стійкості, зміні жорсткості унаслідок зносу тощо) можна припинити розв'язок і після зміни певних параметрів задачі відновити його знову, починаючи з перерваного кроку. Простота використання, наочність, швидкість отримання результатів роблять методику зручною для використання інженерами при розрахунках і в технологічних операціях.

#### Список літератури

1. Рыбакова Л.М. Исследование структуры тонкого поверхностного слоя деформированного металла // Физика и химия обработки металлов. — 1975. — №1. С. 104–109.

2. Ригни Д. Процессы изнашивания при трении скольжения //Трение и износ.-1987. –№8. –С. 17–22.
3. Владимиров В.И. Проблемы физики трения и изнашивания//Физика износостойкости поверхности металлов. Ленинград: ФТИ РАН, 1988. – С. 8–41.
4. Панин В.Е. Поверхностные слои нагруженных твердых тел как мезоскопический структурный уровень деформации //Физ. мезомех. 2001. –Т.4. –№3. –С. 5–22.
5. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин: Справочник. –М.: Машиностроение, 1984. –280 с.
6. Рыжов Э.В., Контактное взаимодействие твердых тел при статических и динамических нагрузках./ Э. В.Рыжов, Ю. В.Колесников, А.Г.Суслов. – Киев.: Наук. думка.1982, –172с.
7. Кравцов В.И. Управление деформированием гибкими пространственно искривленными элементами // Проблемы тертя та зношування. наук.-техн. зб., Вип.№50., НАУ-друк, 2008. – С. 113–121.

Стаття надійшла до редакції 06.03.2013

*A. M. SADEGHJALAL*

#### **TAKING INTO ACCOUNT A CHANGE OF A PROFILE OF ROUGHNESS AT ELASTIC DEFORMATION OF IMPERFECTION**

The method of numerical research of stressedly-deformed condition of a layer of surface of friction in its elastic deformation under the influence of load of different nature taking into account changeable parameters of roughness of contacting surfaces is considered. Change of geometry of roughness due to plastic deformation when processing the surfaces is thus taken into account. Analytical prerequisites are used at numerical research of elastic deformation of imperfections.

**Key words:** roughness, friction, basic surface, numerical research, stressedly-deformed condition, contacting surfaces, loadings.

**Садегіджалал Абді Мехрдад**– аспірант кафедри машинознавства Національного авіаційного університету, [akvarobotec@narod.ru](mailto:akvarobotec@narod.ru).