УДК 621.78(043.2)

В. І. КРАВЦОВ, А. М. САДЕГІДЖАЛАЛ

Національний авіаційний університет

КОНТАКТНА ЗАДАЧА З УРАХУВАННЯМ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ПРИ НОРМАЛЬНОМУ І ТАНГЕНЦІАЛЬНОМУ НАВАНТАЖЕННЯХ

Розглянуто метод числового дослідження напружено-деформованого стану елементу шорсткості в трибоспряженні в його пружному деформуванні під впливом нормального і тангенціального навантажень. Досліджено втрату стійкості при певних умовах деформування.

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

Вступ. У перших роботах, присвячених розв'язку контактних задач, шорсткість поверхонь не враховувалася [1; 2]. Це було продиктовано відсутністю необхідних обчислювальних можливостей. Дотепер будуються розв'язки багатьох контактних задач, ґрунтуючись на задачі про пружний контакт двох тіл, уперше вирішеної Герцом. При розв'язку задачі по Герцу в якості параметрів контакту звичайно виступають форма й розміри плями контакту й тиску в контакті. На основі цього розв'язку може бути також отриманий розподіл напружень у шарі матеріалу, що прилягає до поверхні сполучення контактуючих тіл.

У задачах, розв'язуваних з урахуванням шорсткості поверхні, через дискретність зони фактичного контакту замість цих параметрів контакту розглядається відносна фактична площа контакту (ФПК) – величина, що представляє собою відношення площі поверхні, що фактично бере участь у контакті, до номінальної площі контакту, а також розподіл тисків на ділянках фактичного контакту. Визначення ФПК є однією з найбільш важливих задач, оскільки ця характеристика суттєво впливає на процеси, що протікають в області контакту. Часто потрібно розглядати піддатливість шорсткуватого шару, що представляє собою залежність величини зближення контактуючих тіл від навантаження.

Існує велика група методів, які розглядають статистичні моделі дискретного контакту стосовно до контакту номінально плоских шорсткуватих поверхонь. Докладний огляд цих методів наведено в [3]. Загальна схема розрахунків характеристик контакту зводиться для цих методів до наступного. Висоти шорсткуватої поверхні розглядаються як реалізація випадкового поля, а параметри контакту, у свою чергу, є функціями безлічі випадкових величин, пов'язаних із цим полем. Вводиться функція розподілу висот нерівностей, яка може бути отримана на основі обробки профілограм, або виходячи з досліджень по статистичній геометрії поверхонь. Після цього розв'язується контактна задача про взаємодію одиничної нерівності з контртілом. При цьому нерівності представляються у вигляді простих геометричних фігур, для яких може бути отриманий розв'язок контактної задачі по Герцу. При розв'язку задачі постулюється характер деформування нерівностей (пружний, пластичний тощо). Далі розв'язок для одиничної нерівності поширюється на групу нерівностей. У рамках таких дискретних моделей можна оцінювати відносну фактичну площу контакту, залежність навантаження від зближення, максимальний тиск на одиничній нерівності тощо.

Аналіз сучасних досліджень. Аналітичні методи визначення триботехнічних характеристик взаємодіючих тіл широко застосовуються для випадків, коли шорсткості поверхонь тіл сильно відрізняються, і одну з поверхонь можна вважати плоскою, а іншу – шорсткуватою. Оскільки одержання аналітичного розв'язку суттєво утрудняється для випадку, коли обидві поверхні шорсткуваті, перехід від контакту двох шорсткуватих поверхонь до контакту гладкої поверхні з еквівалентною шорсткуватою поверхнею часто використовується різними авторами при розв'язку задач дискретного контакту як приймання спрощуваного обчислення. Наприклад, у роботі Міхіна А.М. це приймання використане при оцінці залежності фактичної площі торкання від зближення між шорсткуватими поверхнями [4]. У моделі Айнбіндера С.Б. [5] розглядається контакт ізотропної поверхні з гаусовським розподілом висот і ідеально гладкої поверхні. Контакт вважається пружним, а форма нерівностей моделюється поверхнею сфери, еліпсоїда або осесиметричною поверхнею 4-го порядку, якщо нерівності дуже пологі. На підставі перерахованих вище робіт створена інженерна методика розрахунків фактичної площі контакту.

Реальна поверхня завжди являє собою сукупність нерівностей, які відрізняються між собою за основними характеристиками. Тому моделювання нерівностей однаковими геометричними фігурами являє собою досить грубе наближення. У роботі Буша А.В. (Bush), Гібсона Р.Д. і Кеофа Д. (Keogh) [6] авторами запропонована модель, у якій нерівності моделюються еліптичними параболоїдами, кривизна поверхні яких залежить від висоти нерівності. Існують також моделі шорсткуватих поверхонь із нерівностями у вигляді циліндрів, конусів, стрижнів, пірамід [7]. У роботі [8] проаналізовано переваги й недоліки цих моделей.

Залежно від величини зближення тіл із шорсткуватими поверхнями нерівності можуть деформуватися як пружно, так і пластично. У роботі [4] показано, що в процесі приробляння поверхонь відбувається виродження первісних пластичних деформацій у пружні Отже, для прироблених поверхонь можна розв'язувати й пружну задачу, не прибігаючи до методів розв'язання пружно-пластичних задач, враховуючи нове значення коефіцієнта тертя й наявність зміцнення в поверхневому шарі матеріалу.

Існує різноманітність математичних методів і моделей, що дозволяє розв'язувати широкий клас контактних задач. Однак найбільший прогрес досягнуто в розв'язанні плоских і осесиметричних задач. Велика кількість робіт присвячена випадкам, коли розміри області контакту малі в порівнянні з характерним розміром тіл. Тим часом на практиці часто зустрічаються задачі, у яких розміри області контакту порівнянні з розмірами тіла. Крім того, контакт часто передає не тільки нормальне, але й дотичне навантаження. Для таких випадків розв'язані тільки деякі часткові задачі. Чисельні методи мають більші можливості при розв'язуванні таких задач.

Однак усі методи й моделі, що згадані вище, поєднує кілька загальних особливостей. По-перше, усі вони базуються на досить серйозних допущеннях. У силу різних причин автори часто обмежуються розглядом плоскої задачі. У ряді випадків цих моделей виявляється досить. Однак будь-які аналітичні методи розрахунків параметрів контакту дозволяють одержати довідкові дані лише для обмеженого числа задач певних типів; вони не можуть докладно описувати напружено-деформований стан реальних нерівностей деталей, хоча саме ці дані дають уявлення про дійсні умови в контакті.

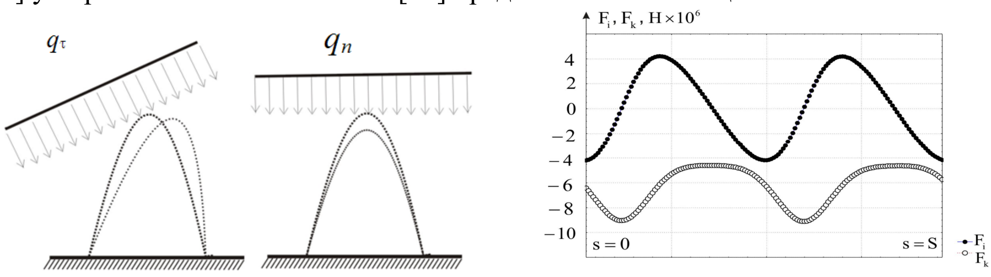
Мета роботи. Таким чином, незважаючи на те, що дослідження параметрів контакту шорсткуватих поверхонь триває вже кілька десятиліть, і в цій області зроблено багато чого, не можна говорити про існування універсальної методики, яка дозволила б ураховувати шорсткість поверхонь при розв'язанні довільних контактних задач для реальних об'єктів. Тому в даній роботі показана спроба використання універсального інструмента [9], який дозволив би розв'язувати задачі дискретного контакту для широкого класу реальних макрооб'єктів шляхом прямого моделювання мікронерівностей, використовуючи в якості вихідних даних результати профілометрії поверхонь контакту цих об'єктів.

Виклад основного матеріалу. Розв'язок проводиться на основі методу, що описує просторове нелінійне деформування трибоелементів чисельними розрахунками через сформульовану систему нелінійних диференціальних рівнянь високого порядку з використання розробленого авторами програмного комплексу [9]. Переваги методу в порівнянні з аналітичними полягають у тому, що можна порівняно легко побудувати розрахункову схему для складного реального об'єкта. Теперішній рівень розвитку комп'ютерів дозволяє порівняно легко проводити розрахунки для схем, що містять десятки й сотні тисяч вузлів і елементів, не вводячи значних припущень, що ідеалізують геометрію розглянутих поверхонь, і це максимально наближає модель до реального об'єкта.

Для використання розробленої методики необхідно одержати інформацію про розподіл мікронерівностей у межах деякої обраної області. При дослідженні геометричних характеристик поверхневого шару деталей звичайно мають справу лише з декількома незалежними вимірами, виконуваними за допомогою профілометра. За один вимір профілометр може одержати інформацію лише про рельєф уздовж однієї лінії. Інформації такого характеру недостатньо для побудови повної схеми, що моделює порівняно велику ділянку поверхні, тут необхідно мати у своєму розпорядженні дані про двовимірний розподіл нерівностей на поверхні, для чого потрібно виконати багато вимірів по паралельних трасах. Оскільки при контакті в реальних умовах поверхні тіл можуть бути орієнтовані довільним чином, головне завдання − по можливості точно змоделювати ділянку поверхні певної площі.

Контактні задачі в загальному випадку не мають точного аналітичного розв'язку, однак існує кілька випадків, для яких були отримані «класичні» розв'язки. Однією з таких задач є задача Герца [10]. Вона розглянута нижче в якості тесту.

Об'єктом дослідження є параболоїд, що має радіуси кривизни 3 і 5 мм і розміри 0,30×0,22×0,14 мм (рис. 1, *а*) і що перебуває в контакті з елементом півпросторів таких же розмірів. Матеріал тіл − сталь із параметрами пружності $E = 210$ ГПа, $\mu = 0{,}3$. Вертикальне навантаження розподілене по верхній грані фрагмента параболоїда й становить 20 Н. Аналітичний розв'язок наведено в [51]. Результати чисельного розв'язку, отримані за допомогою методики, описаної в [9] у порівнянні з аналітичними [10] представлені в таблиця 1.



а *б*

Рис. 1. Елемент шорсткуватого шару під дією тангенціального й нормального навантаження (*а*) і внутрішні зусилля, що виникають при цьому в довільному перерізі (*б*)

Таблиця 1

Результати розв'язку завдання про контакт параболоїда і півпростору

Параметр	Точний розв'язок	Чисельний розв'язок	Відносна погрішність, %
Півосі еліпса контакту, мм	a = 0,095 b = 0,065	a = 0,096 b = 0,067	1,04 1,47
Максимальний тиск у контакті, МПа	1500,0 МПа	1475,7	1,62

Порівняння результатів розв'язку, отриманого чисельним методом із точним свідчить про працездатність алгоритмів розв'язку пружної контактної задачі. Слід зазначити, що пружна постановка задачі є досить серйозним допущенням і застосовна лише для дуже обмеженого діапазону навантажень, при яких величина пластичних деформацій невелика, однак після того, як мікронерівності деформувалися пластично, наступні навантаження приводять уже до пружних деформацій [4; 7]. У цьому випадку розв'язок задачі в пружній постановці може бути виправданим. Використовуючи методи завдання навантажень на елементи шорсткуватості, що описані в [9] можливе дослідження елементів під дією як нормального, так і тангенціального навантаження (див. рис.1).

На рис. 1 показані можливі способи навантаження (рис.1, *а*) і зусилля (рис. 1, *б*), що виникають в одиничному елементі шорсткуватості в міру його деформування по довжині виступу ($0 \leq s \leq \leq S$) з параметрами, зазначеними вище, але при дії й тангенціального навантаження.

Аналізуючи рис. 1, можна зробити висновок, що при дії тангенціального навантаження значення зусиль F_k змінюються зі значною нелінійністю (нижня крива), значення ж зусиль F_i при дії нормального навантаження змінюються майже лінійно. Таким чином, поширюючи отримані результати на площу фактичного контакту шорсткуватого шару, можна одержати його характеристики напружено-деформованого стану в пружній стадії при дії довільного вектора навантажень.

При чисельному дослідженні еволюції контактної взаємодії (рис. 2) у процесі навантаження було встановлено, що руйнування поверхні тертя починається в момент проходження динамічною системою точки біфуркації (рис. 3).

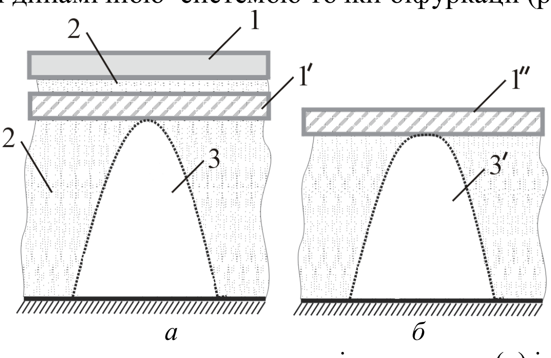


Рис. 2. Деформування елемента шорсткості до контакту (*а*) і після (*б*)

Фізично цей процес виглядає таким чином. У початковій фазі в контакт включені зовнішні поверхневі шари *2*, що складається із забруднень, адсорбованих газів і окислів. Навантаження й, відповідно, трибологічні характеристики визначаються в основному демпфіруванням мастильного шару *2*, крім того, його продукти заповнюють западини між висотами профілю поверхні, − пружність матеріалу *3* профілю в цій фазі відіграє мінімальну роль. При переході до другої фази, коли від зовнішніх поверхневих шарів залишилася функціонувати тільки її частина між западинами, включається в опір пружна складова матеріалу *3* профілю шорсткуватої поверхні при контакті з півпростором $1'$, а грузлий опір характеризується демпфіруванням мастильного шару. Нарешті, у заключній фазі профілі поверхні $3'$ стають деформованими зі зміцненням, а залишки поверхневого шару не виявляють дії, що демпфірує, і весь опір визначається пружною складовою зміцненого матеріалу профілю поверхні.

Кожній з фаз зіставляється певна динамічна система, яка характеризується особливою поведінкою матриці Якобі при чисельному розрахунку системи [9].

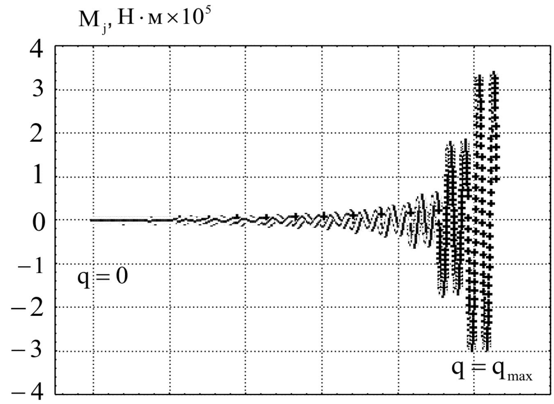


Рис. 3. Значення згинальних моментів у довільному перерізі за мірою збільшення навантаження

Висновки. Аналізуючи фізичний процес і результати чисельного розв’язку (наприклад, значення згинальних моментів у довільному розтині в міру навантаження) можна зробити висновок, що в початковій фазі відбувається пружне деформування шорсткуватого шару (на рис. 3 − до значення $q = q_{max}$), у другій фазі відбувається біфуркаційна втрата стійкості при загальному навантаженні $q = q_{max}$, між другою й третьою фазою, де загальне навантаження $q > q_{max}$ наступає закритична поведінка шорсткуватого шару. Кожній з фаз зіставляється певна динамічна система, яка характеризується особливими значеннями на графіку (рис. 2.). Таким чином, можна зробити висновок, що відбувається фазовий біфуркаційний перехід, після чого починається процес зношування.

Список літератури

1. Галин Л. А., Джонсон К. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости/ Л. А. Галин, К.Джонсон. – М.: Наука, 1980. – 304 с.

2. Тимошенко, С. П. Теория упругости [Текст] / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Наука, 1975. – 576 с

3. Свириденок А.И., Чижик С.А., Петроковец М. И. Механика дискретного фрикционного контакта/ А. И.Свириденок, С. А.Чижик, М. И. Петроковец.– Мн.: Наука и техника, 1990, —272 с.

4. Михин Н. М. Внешнее трение твердых тел / Н. М.Михин. – М. 1977.–256 с.

5. Айнбиндер С. Б., Тюнина Э. Л. Введение в теорию треиия полимеров/ С. Б.Айнбиндер, Э. Л.Тюнина. – Рига, 1978. – 576 с.

6. Bush A.W., Gibson R.D., Keogh G.P. // Mesh Res. Comm. 1976. Vol. 3, N3. P. 169–174.

7. Крагелъский И. В. Основы расчетов на трение и износ [Текст] / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

8. Демкин Н.Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей / Н. Б.Демкин. –М.: Изд-во АН СССР. 1962. –111 с.

9. Кравцов В.И., Садегиджалал А. М., Недбайло А.Н. Бифуркационная потеря устойчивости в элементах трибоспряжения при их упругом деформировании / В.И.Кравцов, А. М.Садегиджалал , А.Н. Недбайло // В мире научных открытий. – № 6.1 (42). – Красноярск, 2013. – С. 298–314.

10. Динник А.Н. Удар и сжатие упругих тел / А. Н. Динник // Изв. Киевск. Политехн. ин-та, 1909, кн. 4.

Стаття надійшла до редакції 30.09.2013

V. I. KRAVTSOV, M. A. SADEGHIJALAL

CONTACT PROBLEM TAKING INTO ACCOUNT THE ROUGHNESS OF THE SURFACE IN NORMAL AND TANGENTIAL LOADING

The method of the numerical investigations of stress-strain state of an element of roughness in the unit of friction in its elastic deformation under the influence of normal and tangential loading. The loss of stability under certain conditions of deformation is investigated.

Key words: deformation, friction, roughness, numerical investigation, mode stress-strain state, the unit of friction, loading, stability.

Кравцов Віктор Іванович – д-р техн. наук, професор, професор кафедри машинознавства Національного авіаційного університету, akvarobotec@narod.ru.
Садегіджалал Мехрдад Абаді – аспірант кафедри машинознавства Національного авіаційного університету, akvarobotec@narod.ru.