
Фізична і колоїдна хімія

Геннадій Сіренко, Микола Семенюк

АДГЕЗІЯ З ДЕФОРМАЦІЄЮ В ЗОНІ КОНТАКТУ АНІЗОТРОПНИХ ШОРСТКИХ ПОВЕРХОНЬ, ЗМОДЕЛЬОВАНИХ ВИПАДКОВИМ ПОЛЕМ

Постановка завдання дослідження

Адгезійна взаємодія між двома твердими тілами залежить від природи і форми цих тіл, природи середовища, що їх розмежує, зовнішніх умов процесів на молекулярному рівні в зоні безпосереднього контакту і величини сили, що визначає процес зближення або роз'єднання тіл [4, с.472; 9, с.280]. Питання про розрахунок величини сили адгезії малих частинок або поверхонь твердих тіл до шорстких поверхонь в умовах недостатньої інформації про контакт цих тіл відноситься до числа невіршених проблем [12, с.432; 13, с.450; 14, с.126]. Експериментально доведено [12, с.432; 13, с.450; 14, с.126], що шорсткість поверхні може збільшувати, або зменшувати силу адгезії порівняно з адгезійною взаємодією частинок з рівними твердими поверхнями, що пов'язано із співвідношенням розмірів частинок і висотою, радіусом кривини та кроком вершин мікронерівностей, числом точок контакту та розташуванням частинок відносно шорсткості поверхонь. Для оцінки впливу шорсткості поверхонь на адгезію у відповідні рівняння [12, с.432] введений ефективний радіус контакту, що враховує механічну шорсткість двох контактуючих тіл, та радіус кривини, який враховує молекулярну шорсткість поверхонь співвідношенням розмірів кристалічної ґратки і висоти вершин мікро-нерівностей. Обмеженість такого підходу наявна. Результати розрахунку сили адгезії частинок і поверхні або шорсткої і рівної поверхонь будуть визначатися вибраними моделями частинок і шорсткої поверхні.

Вибір моделі

При описі шорсткої твердої поверхні і розрахунках фактичної площі контакту /ФПК/ застосовують моделі поверхні у такому вигляді: набору сфер, розподілених по висоті лінійно або нелінійно [7, с.274; 8, с.227; 11, с.1447; 21, с.526; 47, с.918; 48, с.190; 55, с.300; 60, с.89; 68, с.647], набору стрижнів, розподілених по висоті лінійно або за законом Гаусса [20, с.145; 21, с.526; 22, с.480;

23, с.1621], сфер і циліндрів, рівномірно розподілених на поверхні і таких, що мають однаковий радіус кривини і однакову висоту[67, с.921], конусів[28, с.95; 57, с.472; 58, с.235], зрізаних конусів[49, с.372], пірамід[56, с.129], сфер, симетричних клинів, конусів з кутом розхилу $\pi/2$, які мають лінійний, нормальний або Пуассона розподіл по висоті і випадковий розподіл по поверхні[59, с.1168], еліпсоїдів[1, с.224; 28, с.95] тощо

При цьому принускають сталість радіуса або кута при вершині, а закон розподілу висоти нерівностей визначається експериментально

Накладання обмежень на форму виступів віддаляє модель від реальної поверхні. Як засвідчила зйомка топографічної мапи поверхні ряду профілів, реальна форма мікровиступів є далекою від правильної[66, с.109; 70, с.205]. Тому виникає проблема адекватності опису реальної поверхні простими моделями

Так, згідно[1, с.224; 43, с.344], ізотропна шорсткість поверхні виникає після торцевого точіння, електроіскрової, ультразвукової або вібраобразивної обробки, доводки незакріпленим абразивом, шабрування і в окремих випадках – в процесах тертя і зношування. А випадкова анізотропна шорсткість поверхні виникає при шліфуванні циліндричною і торцевою поверхнею кружала, хонінгуванні, суперфінішуванні, прокатці, протяганні і в процесах тертя і зношування.

При механічній обробці і в процесах тертя і зношування виникають нерівності різних розмірів, які розгашовані на інших нерівностях. Опис такої поверхні неможливо зробити простими моделями.

Вплив анізотропної шорсткості на зносостійкість металевих спряжених пар підтверджується роботами[10, с.78; 30, с.137; 45, с.120]. Авторами зроблено висновок, що нормування анізотропної шорсткості необхідне для досягнення високої зносостійкості.

Навіть порівняльний аналіз стрижневої, сферичної і еліпсоїдної моделей показує, що при розрахунках опорної площі стрижнева модель різниться від еліпсоїдної до 30%, а сферична від еліпсоїдної до 15%[29, с.56]

Існують способи опису шорсткої поверхні, що базуються на використанні 24 параметрів шорсткості і хвилястості[17, с.136; 18, с.440], які визначаються по профілограмах профілю поверхні і зняті в кількох напрямках. Обмеженість інформації про шорстку поверхню тертя за допомогою цих 24 параметрів є загальноновизнаним фактом[1, с.224; 43, с.344].

Відомі спроби створення простого критерію оцінки шорсткості, який би у повній мірі характеризував експлуатаційні

властивості поверхні [17, с.136; 26, с.222]. Так, в [15, с.112; 16, с.89] запропонований безрозмірний комплекс:

$$\Delta^* = R_{\max} / \bar{r} b^{1/v},$$

де R_{\max} - найбільша висота нерівностей профілю,

\bar{r} - середній радіус одиничних нерівностей;
 b, v - параметри кривої Аббота - степеневі апроксимації
початкової ділянки відносно опорної довжини профілю t_p^* на заданому рівні p^* [46, с.569];

$$t_p^* = b(h_c / R_{\max})^v;$$

h_c - зближення поверхонь.

Параметри шорсткості, опорна крива, R_{\max} і безрозмірний комплекс Δ^* визначаються по опосередчених даних профілограм.

Дослідження шорсткої поверхні методами одномірних випадкових функцій [32, с.40; 42, с.169; 53, с.279; 71, с.96, 72, с.16] базуються на двох припущеннях: статистичні характеристики поверхні приймаються рівними статистичним характеристикам профілограм цієї ж поверхні; вершини нерівностей вважаються сферичними.

Профілограма вказує на менше число високих піків порівняно з дійсним числом високих вершин на поверхні, тому що профілограма з більшою ймовірністю проходить по схилу виступу на поверхні, ніж по вершині. Навіть для грубої поверхні і поверхні, яка отримана різанням і яка має вузьку спектральну функцію, мало ймовірно, що всі нерівності будуть проходити через середню лінію профілю. Як показано в [41, с.85], середня висота виступів профілю на 80% менша середньої висоти виступів поверхні.

Таким чином, перше припущення приводить до помилки при визначенні розподілу висот вершин, кривини і градієнту поверхні: профілограма дає знижені ймовірності високих вершин, знижені кривини у вершинах і знижені середні градієнти.

На цій же підставі крива опорної поверхні достатньо неточно визначає площу поверхні на відповідному рівні, тому що певна сума відрізків профілограми являє собою переріз нерівностей поверхні по схилах і, таким чином, непропорційна площі на даній висоті.

Ймовірність, що на профілограмі зустрінеться максимальний виступ, дуже мала.

Таким чином, величини r , R_{\max} , b , v , Δ^* визначаються з невеликою точністю. Друге припущення допускає рівність кривин у напрямках осей, що приводить до похибок у визначенні середньої кривини, головних кривин і відношення головних кривин у вершині мікронерівностей.

Наприклад, задача визначення головних кривин і відношення головних кривин у вершинах мікронерівностей вирішується таким чином: в двох перпендикулярних напрямках, які відповідають поздовжній і поперечній шорсткостям, знімаються профілограми, по них визначаються радіуси кривин у вершинах мікронерівностей, які і приймаються за головні.

Дослідження точності цього методу визначення головних кривин і відношення головних кривин показало, що при відносній похибці при значеннях кута похибки $\psi = 1^\circ, 3^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ відношення кривин l міняється від 1 до 0,0004. Так, при $l \geq 0,126$ метод дає задовільні результати. При малому відношенні кривин ($l < 0,126$) із зменшенням l похибка катастрофічно зростає, що веде до непридатності формули для визначення ексцентриситету. Наприклад, при $l < 0,9$ ексцентриситет

$$e^2 \approx 1 - l^{4/3}.$$

Тому необхідно знайти спосіб визначення головних кривин, який не вимагає визначення поздовжнього і поперечного напрямків на поверхні і, таким чином, не був би пов'язаний з кутом похибки ψ .

Для опису статистично однорідної ізотропної поверхні в [25, с. 124; 54, с. 212; 61, с. 245; 62, с. 234; 63, с. 157; 64, с. 321; 65, с. 439] при дослідженні поверхні океану при хвилюванні і в [27, с. 85] при вивченні ізотропної поверхні застосували випадкову функцію для двох змінних $z = z(x, y)$, яка має автокореляційну функцію АКФ $R(x, y)$ і допускає її спектральний розклад Фур'є $\Phi(k_x, k_y)$ на гармонічні компоненти K_x, K_y хвильового

вектора \vec{K} при цьому характеристики поверхні можна виразити через моменти спектральної густини (СГ):

$$m_{pq} = \operatorname{Re} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(k_x, k_y) k_x^p k_y^q dk_x dk_y, \quad (1)$$

де Re – дійсна частина числа.

Лонге-Гігінс отримав співвідношення для густин піків анізотропної гауссовської поверхні [63, с.157; 64, с.321], а в [25, с.124] розглядає питання про кутові коефіцієнти і градієнти такої поверхні.

Наближені методи отримання характеристик анізотропної поверхні на основі теорії випадкових функцій і з використанням кривої опорної поверхні, а також пов'язані з ними методи розрахунків фактичної площі контакту, оцінки триботехнічних властивостей контактуючої поверхні узагальнені в [1, с.224; 17, с.136].

Найяк [27, с.85] отримав розподіл висот вершин, середню кривину у вершині і градієнт ізотропної поверхні тертя, висоти і кривини піків і кутовий коефіцієнт профілограми. Крім того, Найяк розглянув методику знаходження моментів спектральної густини ізотропної поверхні по одній профілограмі, яка виміряна у довільному напрямку, а також показав відмінності густини ймовірностей висот вершин поверхні і піків профілограми від очікуваних значень кривин вершин поверхні і піків профілограми. Встановлена відмінність статистичних характеристик профілограми суттєва і для анізотропної поверхні.

Теорія [27, с.85] застосовувалась для аналізу ізотропної поверхні при пружному контакті [53, с.87], при пластичній течії [51, с.169] і при адгезії [50, с.399]. В [1, с.224] розглянуті деякі наближені методи отримання характеристик анізотропної поверхні, а в [2, с.241; 3, с.651] – розрахунки з використанням моделі ізотропних поверхонь.

Модель анізотропної шорсткої поверхні у вигляді реалізації однорідного випадкового поля $z = z(x, y)$, отриманого із відповідного ізотропного поля шляхом розтягування по одній з координат, розглянута в [6, с.14; 58, с.235]. Ця модель являє собою рідкісний випадок анізотропної поверхні, яка може бути отримана при окремих видах абразивної обробки або фрикційного припрацювання.

Використовуючи рідкісний випадок апроксимації АКФ виду

$$R(x, y) = \exp[-(a_1x^2 + a_2y^2)],$$

в [24, с.152] аналізується анізотропна поверхня. Вибір такої апроксимації пов'язаний з тим, щоб далі отримати матрицю кореляційних співвідношень для анізотропної поверхні, яка співпадала б по структурі з матрицею кореляційних співвідношень

для ізотропної поверхні. Це говорить про штучний підхід до опису анізотропної поверхні.

Взагалі, апроксимація АКФ функціями визначеного виду[31, с.5; 32, с.210; 33, с.17; 34, с.3; 71, с.97] веде до огрублення випадкового процесу і може бути джерелом похибок при визначенні СГ. Необґрунтованість подібного підходу показана в[27, с.85].

Відзначимо, що в[5, с.16] аналізується поодинокий випадок анізотропної поверхні, яка має виступи з великим ексцентриситетом і орієнтованих в одному напрямку, причому вісь ОХ орієнтована в напрямку мікронерівностей. Тоді в силу симетрії будемо мати такі співвідношення моментів СГ: $m_{11} = m_{13} = m_{31} = 0$. Крім того, $m_{04} \gg m_{40}$, що рівнозначно $m_{02} \gg m_{20}$.

Для опису такої поверхні необхідно мати п'ять параметрів: дисперсію висот поверхні відносно середньої площини m_{00} , середні квадрати кутів нахилу в двох головних напрямках m_{20} і m_{02} і середні квадрати двох головних кривин m_{40} і m_{04} . Стосовно такої поверхні авторами [5, с.16] розглядається фактична площа контакту (ФПК) і умови переходу пружного деформування до пластичної течії.

Використовуючи модель випадкового поля шорсткої поверхні і не пов'язуючи її з АКФ якогось певного виду, не використовуючи припущення, які прийняті для опису поверхні одномірними випадковими функціями або поверхні з сильною анізотропією і орієнтованими мікронерівностями, а також не припускаючи певної форми нерівностей, в[35, с.22; 37, с.467; 38, с.465, 40, с.22; 41, с.85; 69, с.60] отримано співвідношення для законів розподілення основних параметрів анізотропних поверхонь: густини ймовірності висот вершин, середньої кривини у вершині мікронерівностей, градієнту поверхні, певної кривини у вершині, головних кривин і співвідношення головних кривин у вершині мікронерівностей анізотропної поверхні, а також для середньої висоти виступів шорсткої поверхні і густини плям контакту при сполученні шорсткої поверхні з рівною.

При цьому, з опису топографії анізотропної поверхні як частинний випадок витікали результати для ізотропної поверхні, які для густини ймовірності висот вершин, середньої кривини мікронерівностей поверхні у вершині і градієнта були приведені до раніше відомих результатів[27, с.85], крім того, дослідження фактичної площини контакту за методами опорних кривих і випадкового поля показало, що запропонована в[37, с.465] модель опису анізотропної поверхні випадковим полем дає розрахунок ФПК близький до експериментального[36, с.467], що дозволяє прийняти цю модель у подальших теоретичних дослідженнях адгезійної взаємодії.

Результати дослідження

Розглянемо адгезійну взаємодію еліпсоїдної частинки з жорсткою рівною поверхнею з урахуванням деформації в зоні контакту.

Нехай система координат розташована таким чином, що вісь OZ нормальна до рівної поверхні, а осі OX і OY знаходяться в площинах головних нормальних перерізів частинки, кривини яких H_1 і H_2 .

Зближення еліпсоїдної частинки H_c , відстань між поверхнями H_r (рис.1), а $\omega(x, y)$ – рівняння поверхні частинки, то, розкладаючи $\omega(x, y)$ в ряд Тейлора і нехтуючи членами третього порядку, отримаємо рівняння еліптичної поверхні у вигляді:

$$\omega = \frac{1}{2} H_1 x^2 + \frac{1}{2} H_2 y^2$$

Переріз на рівні ω являє собою еліпс

$$\frac{x^2}{\frac{2\omega}{H_1}} + \frac{y^2}{\frac{2\omega}{H_2}} = 1$$

з напівосьми

$$a_1 = \sqrt{\frac{2\omega}{H_2}}; \quad b_1 = \sqrt{\frac{2\omega}{H_1}}$$

Ексцентриситет еліпса

$$e = \sqrt{1 - \frac{a_1^2}{b_1^2}} = \sqrt{1 - l},$$

де l - співвідношення кривин.

Площина еліпсу на рівні перерізу ω :

$$S(\omega) = \frac{2\pi\omega}{\sqrt{H_1 H_2}} = \frac{2\pi\omega}{\sqrt{K}}, \quad (2)$$

де K – повна кривина поверхні частинки.

Площа перерізу $S_1(\omega)$ на рівні

$$\omega \geq H_p + H_c \quad (3)$$

пружно деформованої еліпсоїдної частинки відрізняється від відповідної площі недеформованої частинки в $\alpha_c(\omega)$ разів:

$$S_1(\omega) = \alpha_c(\omega)S(\omega). \quad (4)$$

На площадці контакту маємо умови:

$$\omega = H_c + H_p, \quad (5)$$

а відношення $\alpha_c(\omega)$ дорівнює:

$$\alpha_c(H_p + H_c) = \frac{E(e_y)}{U(e_y)(l+1)^{1/6}}, \quad (6)$$

де $U(e_y)$, $E(e_y)$ - повні еліптичні інтеграли 1-го і 2-го роду відповідно [19, с. 832],

e_y - ексцентриситет площадки пружно деформованої частинки.

Згідно (6), α_c залежить лише від геометричного фактора l і не залежить від силового фактора – діючої сили. α_c приблизно дорівнює 0,5 при пружному контакті і зміні l від 0,0005 до 1,0 (рис.2). Для пластично деформованої частинки $\alpha_c = 1$.

Сила молекулярної взаємодії двох площин у розрахунку на одиницю площі дорівнює [12, с.432]:

$$F_1 = \frac{\pi n_j \lambda_l}{2H_*^4}, \quad (7)$$

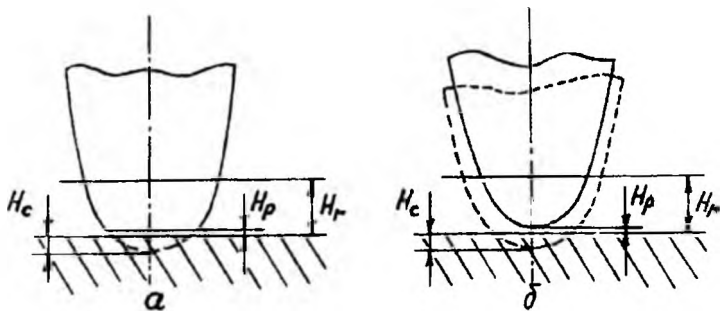


Рис. 1 Схема контакту еліпсоїдної частинки з жорсткою рівною поверхнею:

а – пластичний контакт; б – пружний контакт

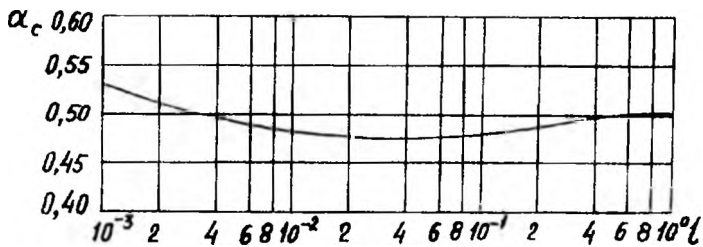


Рис. 2. Залежність співвідношення площ контакту і перерізу від співвідношення головних кривин у вершині.

де n_1 – число молекул (n_1, n_2) в одиниці об'єму контактуючих тіл;

λ_1 – стала Лондона,

H_r – відстань між площиною і перерізом.

Враховуючи швидке згасання сили F_1 із зростанням відстані H_r , для знаходження сили молекулярної взаємодії частинки і площини приймемо такі обмеження: верхня границя інтегрування дорівнює нескінченності, у випадку пружного контакту $\alpha_c(\omega) \approx 0,5$ при $\omega > H_c + H_p$.

Сила молекулярної взаємодії частинки і площини дорівнює:

$$F_m = \alpha_c \int_{H_p}^{\infty} \frac{\pi n_1 \lambda_1}{2 H_r^4} \cdot \frac{n_2 2 \pi (H_r + H_c)}{\sqrt{K}} dH_r =$$

$$= \frac{\alpha_c A}{6 H_p^2 \sqrt{K}} \left(3 + 2 \frac{H_c}{H_p} \right), \quad (8)$$

де $A = \pi^2 n_1 n_2 \lambda_1$ – стала Ван-дер-Ваальса.

З (8) як частинний випадок витікає результат [12, с.432] молекулярної взаємодії кульової частинки діаметром d з площиною. Тут $\sqrt{K} = 2/d$, а $\alpha_c = 1$, оскільки не враховувалась різниця між деформованою і недеформованою частинкою на відповідних перерізах, що справедливо лише для пластичного контакту. При цьому замість H_c необхідно взяти $H_1 = H_c + H_p$, тоді (8) набуде вигляду:

$$F_m = \frac{Ad}{12 H_p^2} \left(3 + \frac{2(H_1 - H_p)}{H_p} \right) = \frac{Ad}{12 H_p^2} \left(1 + \frac{2H_1}{H_p} \right), \quad (9)$$

що співпадає з [12, с.432].

У випадку пружного контакту сила адгезії зменшиться силою відштовхування F_0 за рахунок пружних властивостей контактуючих тіл (для пластичного контакту $F_0 = 0$):

$$F_0 = R_2 E' \frac{H_c^{3/2}}{H^{1/2}}, \quad (10)$$

$$\text{де } R_2 = \frac{2\pi}{3U(e_y)} \left[\frac{E(e_y)}{U(e_y)(1-e_y^2)} \right]^{1/2}; \quad (11)$$

E' - зведений модуль Юнга контактуючих тіл;
 \bar{H} - середня кривина.

Таким чином, сила адгезійної взаємодії еліпсоїдної частинки з площиною з урахуванням деформації в зоні контакту дорівнює:

$$F_y = \frac{A}{12H_p^2\sqrt{K}} \left(3 + 2\frac{H_c}{H_p} \right) - R_2 E' \frac{H_c^{3/2}}{\bar{H}^{1/2}}; \quad (12)$$

при пластичному контакті:

$$F_n = \frac{A}{6H_p^2\sqrt{K}} \left(3 + 2\frac{H_c}{H_p} \right). \quad (13)$$

2 Визначимо питому силу адгезії пружної шорсткої поверхні, змодельованої випадковим полем [37, с. 465; 38, с. 815], до жорсткої рівної поверхні при пружно-пластичному контакті.

Використовуючи (12), силу адгезії виступу висотою ε'_1 шорсткої поверхні, що контактує пружно з жорсткою рівною поверхнею на рівні h , визначимо так:

$$F_{iy}(\varepsilon'_1) = \frac{A}{12m_{00}h_p^2\sqrt{K(\varepsilon'_1)}} \left[3 + \frac{2(\varepsilon'_1 - h)}{h_p} \right] - R_2(\varepsilon'_1) E' m_{00}^{3/4} \frac{(\varepsilon'_1 - h)^{3/2}}{\bar{H}^{1/2}(\varepsilon'_1)}, \quad (14)$$

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon_1}{\sqrt{m_{00}}} = \frac{\varepsilon_1}{\sigma} = \frac{z}{\sigma};$$

де

$$\varepsilon_1 = z;$$

σ - середнє квадратичне значення висоти мікронерівностей;

m_{00} - момент СГ нульового порядку (1);

$$K(\varepsilon'_1) = \frac{S(\varepsilon'_1)}{\rho(\varepsilon'_1)} \quad \text{- повна кривина мікронерівності у вершині висотою } \varepsilon'_1;$$

$\rho(\varepsilon'_1)$ - густина ймовірності висот вершин у точці ε'_1 [37, с.465];

$S(\varepsilon'_1)$ - функція [38, с.815];

$$R_2(\varepsilon'_1) = \frac{2\pi}{3U(e_y)} \left[\frac{E(e_y)}{U(e_y)(1-e_y^2)} \right]^{1/2};$$

e_y - ексцентриситет площадки контакту пружно деформованого виступу висотою ε'_1 , який визначається за рівнянням [44, с.270]:

$$l(\varepsilon'_1) = \frac{(1-e_y^2)[U(e_y) - E(e_y)]}{E(e_y) - (1-e_y^2)U(e_y)} \quad \text{- співвідношення головних кривин};$$

де $H_1(\varepsilon'_1)$ і $H_2(\varepsilon'_1)$ - головні кривини у вершині висотою (ε'_1) [38, с.815];

$\bar{H}(\varepsilon'_1)$ - середня кривина у вершині висотою (ε'_1) [37, с.465];

$h = d'm_{00}^{-1/2}$ - наближення [38, с.815], де d' - відстань між середньою площиною шорсткої поверхні і жорсткою рівною поверхнею при заданому зусиллі;

Зближення h_c і наближення h виступу висотою ε'_1 шорсткої поверхні до жорсткої рівної поверхні зв'язані співвідношенням [38, с.815]:

$$h_c(\varepsilon'_1) = \varepsilon'_1 - h$$

Наближення h пов'язане з ансамблем мікронерівностей, а зближення h_c – з одиничною найвищою нерівністю.

Використовуючи (13), силу адгезії виступу висотою (ε'_1) жорсткої поверхні, що контактує пластично з жорсткою гладкою поверхнею на рівні h , визначено так:

$$F_{in}(\varepsilon'_1) = \frac{A}{6m_{00}h_p^2\sqrt{K(\varepsilon'_1)}} \left[3 + \frac{2(\varepsilon'_1 - h)}{h_p} \right]. \quad (15)$$

Звідси математичне сподівання сили адгезії плями контакту:

$$\begin{aligned} \bar{F}_i = \frac{D}{\delta} \int_h^\infty p(\varepsilon'_1) \left\{ F_{iy}(\varepsilon'_1) V_1[\xi_1(\varepsilon'_1)] + \right. \\ \left. + F_{in}(\varepsilon'_1) V_2[\xi_2(\varepsilon'_1)] \right\} d\varepsilon'_1, \end{aligned} \quad (16)$$

де D – густина вершин мікронерівностей [25, с. 124];

δ – густина плям контакту при заданому наближенні, що на підставі [25, с. 124; 37, с. 465] дорівнює:

$$\delta = D \int_h^\infty p(\varepsilon'_1) d\varepsilon'_1; \quad (17)$$

$$V_1(\xi_1) = \begin{cases} 1 \text{ при } \xi_1 > 0 \\ 0 \text{ при } \xi_1 \leq 0 \end{cases}; \quad (18)$$

$$V_2(\xi_2) = \begin{cases} 1 \text{ при } \xi_2 \geq 0 \\ 0 \text{ при } \xi_2 < 0 \end{cases}; \quad (19)$$

$$\xi_1(\varepsilon'_1) = h_c(\varepsilon'_1) + h - \varepsilon'_1; \quad (20)$$

$$\xi_2(\varepsilon'_1) = \varepsilon'_1 - h - h_c(\varepsilon'_1). \quad (21)$$

Тут для пружного контакту $V_2(\xi_2) = 0$, для пластичного - $V_1(\xi_1) = 0$. Силу адгезії, що припадає на одиницю номінальної площі шорсткої поверхні, назвемо питомою силою адгезії.

Питома сила адгезії пружної шорсткої поверхні, що змодельована випадковим полем [37, с.465; 38, с.815], до жорсткої рівної поверхні дорівнює:

$$F = D \int_h^{\infty} p(\varepsilon'_1) \left\{ \left[\frac{A}{12m_{00}h_p^2 \sqrt{K(\varepsilon'_1)}} \left(3 + \frac{2(\varepsilon'_1 - h)}{h_p} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - R_2(\varepsilon'_1) E' m_{00}^{\frac{1}{4}} \frac{(\varepsilon'_1 - h)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{H(\varepsilon'_1)}} \right] V_1[\xi_1(\varepsilon'_1)] + \right. \\ \left. + \frac{A}{6m_{00}h_p^2 \sqrt{K(\varepsilon'_1)}} \left(3 + \frac{2(\varepsilon'_1 - h)}{h_p} \right) V_2[\xi_2(\varepsilon'_1)] \right\} d\varepsilon'_1,$$

де $h_p = H_p \sqrt{m_{00}}$ - безрозмірна величина товщини прошарку між контактуючими тілами.

Аналогічно в [39, с.1010; 69, с.60] використана модель випадкового поля [35, с.22, 37, с.465; 38, с.815] для опису контактних явищ - фактичної площі контакту, коефіцієнта тертя, термічного та електричного опору, питомої площі поверхні та питомого об'єму зазору спряжених шорстких поверхонь

Висновки

1. На підставі аналізу описів шорсткої твердої поверхні вибрана модель випадкового поля для адгезійної взаємодії.

2. Отримана формула для розрахунку сили молекулярної взаємодії еліпсоїдної частинки з шорсткою рівною поверхнею з урахуванням деформації в зоні контакту.
 3. Отримана формула для розрахунку питомої сили адгезії пружної шорсткої поверхні, що змодельована випадковим полем, до жорсткої пружної поверхні при пружно-пластичному контакті з урахуванням деформації в зоні контакту.
 4. У цих дослідженнях розглядається лише молекулярна складова адгезії. Електричні явища та подвійні електричні шари, що виникають при контакті тіл, відіграють значну роль в адгезії твердих тіл. Врахування внеску шорсткості поверхні в електричну складову адгезії теж є складним завданням дослідження.
1. Айнбиндер С.Б., Тюнина Э.Л. Введение в теорию полимеров. – Рига: Зинатне, 1978. – 224 с.
 2. Айнбиндер С.Б., Тюнина Э.Л. Трение полимерных материалов. Расчет коэффициента трения при контакте изотропных поверхностей// Механика полимеров. – 1977. - №2. – С 241
 3. Айнбиндер С.Б., Тюнина Э.Л. Трение полимерных материалов. Расчет коэффициента трения при контакте поверхностей с неровностями несферической формы// Механика полимеров. – 1977. - №4. – С.651.
 4. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физматгиздат, 1963. – 472 с.
 5. Буш А.В., Гибсон Р.Д., Кио Г.П. Шероховатые поверхности с сильной анизотропией// Проблемы трения и смазки – 1979 – Т.101.- Сер. F - №1. – С.16.
 6. Гупта П.К., Кук Н.Х. Статистический анализ механического взаимодействия шероховатых поверхностей// Проблемы трения и смазки. – 1972. – Т.94, №1. – С.14.
 7. Демкин Н.Б. Геометрия и механика контактирования шероховатых тел// Теория трения, износа и проблемы стандартизации. – Брянск: Брянское книжное изд-во, 1978. – С.274.
 8. Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 227 с.
 9. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. – М.: Наука, 1973. – 280 с.
 10. Долголенко В.П. Влияние направления следов обработки на износ плоских пар трения// Качество поверхности деталей машин. - №4. – М. Изд-во АН СССР, 1959. – С.78.

11. Журавлев В.А. К вопросу о теоретическом обосновании закона Амонтона-Кулона для трения несмазанных поверхностей// Журнал технической физики. – 1940. - Т.10.- Вып.17. – С.1447.
12. Зимон А.Д. Адгезия пыли и порошков. – М.: Химия, 1976. – 432с.
13. Зимон А.Д., Серебряков Г.А. Журнал физической химии. - Т.45. - №2. – С.450.
14. Зимон А.Д., Серебряков Г.А. Журнал физической химии. - Т.46. - №1. – С.126.
15. Комбалов В.С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. – М.: Наука, 1974. – 112с.
16. Комбалов В.С. О комплексной оценке шероховатости поверхностей в задачах трения и износа и ее связи с величиной Δ^* // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. – М.: Наука: 1971. – С.89.
17. Комбалов В.С. Оценка триботехнических свойств контактирующих поверхностей. – М.: Наука, 1983. – 136с.
18. Комбалов В.С. Состояние и перспективы работ по исследованию влияния шероховатости на фрикционные характеристики пар трения// Трение и износ. – 1980. – Т.1, №3. – С.440.
19. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Пер. И.Г. Арамановича, А.М. Березмана, И.А. Войнштейна и др. – М.: Наука, 1978. – 832с.
20. Крагельский И.В. Влияние различных параметров на величину коэффициента трения несмазанных поверхностей// Журнал технической физики. 1943. – Т.13 - Вып.13. – 145с.
21. Крагельский И.В., Добычин М.Н. Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526с.
22. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968 – 480с.
23. Крагельский И.В. Трение покоя двух шероховатых поверхностей// Известия АН СССР, ОТН. – 1948. - №10 – С.1621
24. Кризберг Ю.Я., Кокин В.П., Рудзит Я.А. Определение микротопографических параметров нерегулярной шероховатости// Технологические методы повышения качества поверхности деталей машин. – Л.: Ленинградский университет, 1978. – С.152
25. Лонге-Хиггинс М.С. Статистическая геометрия случайных поверхностей// Гидродинамическая неустойчивость. – М.: Мир, 1964. – С.124.

26. Михин Н.М. Внешнее трение твердых тел. – М.: Наука, 1977. – 222с.
27. Найяк П.Р. Применение модели случайного поля для исследования шероховатых поверхностей// Проблемы трения и смазки. – 1971. - Т.93 - Сер.Ф.- №3. – С.85.
28. Площадь фактического контакта сопряженных поверхностей/ П.Е. Дьяченко, Н.Н. Толкачева, Г.А. Андреева, Т.М. Карпова. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 95с.
29. Рыжов Э.В. Опорная площадь поверхностей, подвергнутых механической обработке// Вестник машиностроения. – 1964. - №4. – С.56.
30. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости// Трение и износ. – 1980. – Т.1.- №1. – С.137.
31. Рудзит Я.А., Звиедрис А.В. Методические основы определения более сложных статистических характеристик шероховатости// Приборостроение. – Вып.9 – Рига: Рижский политехнический институт, 1973.
32. Рудзит Я.А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. – Рига: Зинатне, 1975. – 210с.
33. Рудзит Я.А., Одитис И.А., Лининьш О.А. Определение исходных параметров профиля нерегулярной шероховатости// Приборостроение. – Вып.9. – Рига: Рижский политехнический институт, 1973. – С.17.
34. Рудзит Я.А., Одитис И.А. О параметрах нерегулярной шероховатости поверхности// Приборостроение. – Вып.8. – Рига: Рижский политехнический институт, 1972. – С.3.
35. Семенюк Н.Ф. Исследования топографии поверхностей методом случайного поля и разработка расчетных методов оценки фактической площади контакта при трении твердых тел: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.04 – Якутск: Ин-т физико-техн. проблем Севера СО ЯФ АН СССР, 1983. – 22с.
36. Семенюк Н.Ф., Калмыкова Т.Ф. Фактическая площадь упругого контакта анизотропной шероховатой поверхности с гладкой// Трение и износ. – 1983. – Т.4.- №3. – С.467.
37. Семенюк Н.Ф., Сиренко Г.А. Описание топографии анизотропных шероховатых поверхностей трения при помощи модели случайного поля (сообщ.1)// Трение и износ. – 1980. – Т.1.- №3. – С.465.
38. Семенюк Н.Ф., Сиренко Г.А. Описание топографии анизотропных шероховатых поверхностей трения при помощи модели случайного поля (сообщ.2)// Трение и износ. – 1980. – Т.1.- №5. – С.815.

39. Семенюк Н.Ф., Сиренко Г.А. Описание топографии анизотропных шероховатых поверхностей трения при помощи модели случайного поля (сообщ.3)// Трение и износ. – 1980. – Т.1.- №6. – С.1010.
40. Семенюк Н.Ф., Сиренко Г.А. Топография и контактные явления анизотропных шероховатых поверхностей трения// Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конфер. “Трибоника и антифрикционное материаловедение”. – Новочеркасск. 27-29. 05. 1980. – Новочеркасск: Изд-во Новочеркас. политех. ин-та, 1980. – С.22.
41. Семенюк Н.Ф. Средняя высота выступов шероховатой поверхности и плотность пятен контакта при контактировании шероховатой поверхности с гладкой// Трение и износ. – 1986. – Т.7.-№1. – С.85.
42. Харач Г.М., Эклер Л.И. Об определении характеристик микрогеометрии поверхности со случайной шероховатостью при расчетах трения и износа// Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. – М.: Наука, 1971. – С.169
43. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход. – М.: Наука, 1975. – 344с.
44. Штаерман И.Я. Контактная задача теории упругости. – М. – Л.: Гостехиздат, 1949. 270с.
45. Якобсон М.О. Качество поверхности и долговечность прямолинейных направляющих металлорежущих станков// Качество поверхности деталей машин - №5. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – С.120.
46. Abbot E.J., Firestone F.A. Specifying surface quality// Mech. Eng. – 1933. – VOL.55. – P.569.
47. Archard J.E. Elastic Deformation and the Contact of Surfaces// Nature. – 1951. Vol.192. – P.918.
48. Archard J.E. Elastic Deformation and the laws of friction// Proc. Roy. Soc. – 1957. – Ser.A - Vol.243 - N1233. – P.190.
49. Bowden F.P., Tabor D. The friction and lubrication of solids// Clarendon Press. – Oxford. – 1954. – P.372. :
50. Bush A.W., Gibson R.D., Keogh G.P. Adhesion of rough surfaces// Wear. – 1976. – Vol.40. – P.399.
51. Bush A.W., Gibson R.D., Keogh G.P. The limit of elastic deformation in the contact of rough surfaces// Res. Comm. Mech. – 1976. – Vol.3. – P.169.
52. Bush A.W., Gibson R.D., Thomas T.R. The elastic contact of a rough surface// Wear. – 1976. – Vol.35. – P.87.

53. Cooper M.G., Mikis B.B, Yovanovich M.M. Thermal contact conductance// *International Journal of heat and mass transfer.* – 1969 – Vol.12. – P.279.
54. Gartwright D. E., Longuet-Higgins M. S. The statistical distribution of the maxima of a random function // *Proceedings of the Royal Soc.* – London. – 1956. – Vol. 237. - Ser A, N1209. – P. 212.
55. Greenwood J. A., Williamson J.B.P. Contact of Nominally Flat Surfaces// *Proceedings of the Royal Society.* – 1966. – Ser.A.- Vol.295.- N1442. – P.300.
56. Hisacado T. On the mechanism of Contact between Solid Surfaces (4th report). Surface Roughness Effects on Dry Friction// *Bull. ISME.* – 1970. – Vol.13, N55. – P.129.
57. Joshimoto G., Tsukizoe T. On the Mechanism of wear between Metal Surfaces// *Wear.* – 1958. – Vol.1, N6. – P.472.
58. Kubo M. Peklenik J. An analysis of micro-geometrical isotropy for random surfaces structures// *Ann. of CIRP.* – 1968. –Vol.16. -- P.235.
59. Ling F.F. On Asperity Distributions of Metallic Surfaces// *J.of Appl Phycsics.* – 1958. - Vol.29, N8. – P.1168.
60. Longe A S., Howell H.G. Friction of Elastic Solids// *The Proceedings of the Physical Society.* – 1954. – Vol.67, N410. – P.89.
61. Longuet-Higgins M.S. On the statistical distribution of the hights of sea waves// *J.Marine Research.* – 1952. - Vol.11. - N3. – P.245.
62. Longuet-Higgins M.S. Statistical Properties of a moving waveform// *Proc. Cambridge Philos. Soc.* – London, 1956. - N52. – P.234.
63. Longuet-Higgins M.S. Statistical Properties of an isotropic random surface// *Philos. Trans. of the Royal Soc.* – London, 1957. – Vol.250 - Ser.A. – P.157.
64. Longuet-Higgins M.S. The Statistical Analysis of a Random Moving Surface// *Philos. Trans. of the Royal Soc.* – London, 1957. – Vol 249.- Ser.A. – P.321.
65. Longuet-Higgins M.S. The Statistical distribution of the curvature of a random gaussian surface// *Proc. Cambridge Philos. Soc.* – London, 1958. - N54 – P.439.
66. Lubricant films in rolling contact of rough surfaces/ T.E. Tallian, Y.P. Chui, D.F. Huttenlocher, J.S. Kamenshine, L.B. Sibley, N.E. Sindlinger// *Transactions of the ASLE.* – 1964. – Vol.7. – P. 109.
67. Rubinstein C. A general theory of the surface friction of solids// *Proc. Phys. Soc.* – 1956. – Sect.B, Vol.69. – P.921.
68. Schallamach A. The Load Dependence of Rubber Friction// *The Proceedings of the Physical Society.* – 1952. – Vol.65B. – P.647.
69. Sirenko G., Semenyuck M. Surface Phenomena on Rough Mating Surfaces Modelled by an Anisotropic Random Fields// *Abstracts,*

information and participants Ukrainian-French Symposium << Condensed Matter: Science and Industry. – Lviv, 20-27 February 1993. – Lviv: IPhCS NANU, 1993. – P.60.

70. Thomas T.R. Recent advances in the measurement and analysis of surface microgeometry// *Wear*. – 1975. – Vol.33.- N2. – P.205.
71. Whitehouse D.J., Archard J.F. The Properties of Random Surfaces of Significance in the contact// *Proceedings of the Royal Soc.* – 1970. – Vol.316.- Ser.A. – P.97.
72. Whitehouse D.J., Archard J.F. The properties of random surfaces in contact// *Surface Mechanics, Proceedings of the ASME Annual winter meeting*. – Los Angeles, Calif. – 1969. –November. – P.16.

G.O. Sirenko, M.F. Semenyuck. Adhesion with taking into account deformation of the contact area of the base description of anisotropic rough surfaces modelled by random fields. On the basis of the theory of anisotropic rough surfaces modelled by a random field (was worked out by the authors) surface phenomena on mating surfaces are considered.

The problem of adhesion interaction of the anisotropic rough surface with the rigid smooth one with due account of summit deformation in the region of elastic and plastic contact was also considered.

The ellipsoidal model of asperities of contact of particle with the smooth rigid plain has been used for the calculations of the adhesion forces.

Fig.2, Litr. 72.