

Чумак Костянтин¹, Мартиняк Ростислав²

¹докторант, к.ф.-м.н., ст.н.с., Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна, e-mail: chumakostya@gmail.com

²провідний науковий співробітник, д.ф.-м.н., професор, Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна, e-mail: mrostyslav@gmail.com

АДГЕЗІЙНА ВЗАЄМОДІЯ МІКРОТЕКСТУРОВАНОЇ ЖОРСТКОЇ ОСНОВИ ТА ПРУЖНОГО ПІВПРОСТОРУ ЗА КОНТАКТУ ПОВЕРХОНЬ В МЕЖАХ ІНТЕРФЕЙСНИХ ЗАЗОРІВ

Досліджено контакт жорсткої основи, текстурованої мікрОВІЙМКАМИ прямокутної форми, та пружного півпростору за наявності ділянки контакту та зон адгезії в межах кожної виїмки. Побудовано аналітично-числовий розв'язок сформульованої задачі та проаналізовано вплив зовнішнього навантаження, сил адгезії та геометричних параметрів текстури на розподіл контактного тиску, еволюцію зазорів, ділянок контакту та зон адгезії.

Ключові слова: адгезійний контакт, модель Можіса-Дагдейла, поверхнева мікротекстура, прямокутна виїмка, інтерфейсний зазор.

Адгезія поверхонь має істотний вплив на функціонування сучасних мікро- і нано-електромеханічних (MEMS/NEMS) пристроїв, знижуючи їх ефективність і надійність та зумовлюючи їх несправність [1]. Раптове збільшення площі контакту між поверхнями, що зближуються (jump-in), стрибкоподібне порушення адгезійного зв'язку поверхонь під дією розтягувальних зусиль (jump-out), а також адгезійний гістерезис (для відриву поверхонь потрібна більша сила, ніж та, що була необхідна для їх початкового з'єднання) є поширеними явищами для адгезійної взаємодії поверхонь тіл. Мікротекстурування є одним із найпопулярніших методів модифікації контактуючих поверхонь для контролю адгезії та покращення їх функціональних характеристик.

Дана робота присвячена дослідженню контакту пружного півпростору S_1 , поверхня якого є ідеально плоскою, та жорсткої основи S_2 , текстурованою розташованими з періодом d виїмками прямокутної форми сталої глибини $r(x) = -A$ та ширини a ($A \ll a$). Тіло S_1 перебуває в умовах плоскої деформації та притискається до тіла S_2 рівномірно розподіленими на нескінченності зусиллями інтенсивності p (рис. 1). Поверхні тіл контактують на ділянці ширини b в межах кожної виїмки. На ділянках (—



$c, -b'$) та (b, c) , де відстань між поверхнями тіл не перевищує значення $h_0 \approx 0.97\varepsilon$ (ε - рівноважна відстань між поверхнями), діють сили адгезії сталої інтенсивності c_0 (модель Можіса-Дагдейла [2]).

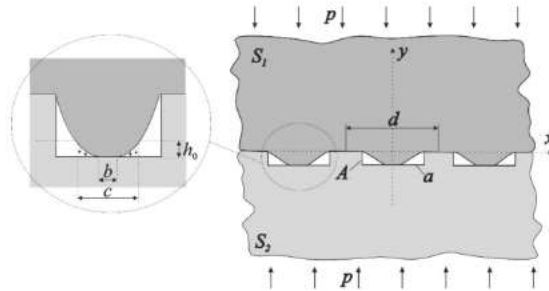


Рисунок 1 – Модель контакту тіл

Зважаючи на вищесказане, крайові умови сформульованої задачі мають вигляд (оскільки задача періодична, умови наведено лише для інтервалу $|x| < d/2$):

$$\sigma_{xy} = 0, u_y = 0, a \leq |x| \leq d/2; \quad (1)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma_0, b/2 < |x| \leq c/2, \sigma_{yy} = 0, c/2 < |x| < a/2, \sigma_{xy} = 0, |x| < a/2; \quad (2)$$

$$\sigma_{xx} = 0, \sigma_{yy} = -p, \sigma_{xy} = 0, \sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow \infty. \quad (3)$$

Тут $\sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{yy}$ – компоненти тензора напружень, u_y – компонента вектора переміщень в напрямку осі y .

З використанням розробленої в праці [3] методики дослідження адгезійного контакту тіл з текстурованими поверхнями цю задачу зведено до наступного сингулярного інтегрального рівняння (СІР) відносно похідної висоти зазору $h(\xi)$

$$\int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{h'(\eta)}{\eta - \xi} d\eta = \frac{dK}{2} \frac{p + \sigma(\xi)}{\xi^2 + 1}, \quad h(\pm\alpha) = 0, \quad (4)$$

Де $\sigma(\xi) = \sigma_0, \beta < |\xi| \leq \chi, \sigma(\xi) = 0, \chi < |\xi| < \alpha$ та $\sigma(\xi) = -P(\xi) = \sigma_{yy}, |\xi| \leq \beta; \xi = tg(\pi x/d), \eta = tg(\pi t/d), \alpha = tg(0.5\pi a/d), \beta = tg(0.5\pi b/d), \chi = tg(0.5\pi c/d); K = 4(1 - \nu_1^2)E_1, E_1$ та ν_1 модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона матеріалу тіла S_1

Розв'язавши рівняння (4) аналітично, знайдемо похідну висоти зазору

$$h'(\xi) = h'_1(\xi) + \frac{dK}{2\pi^2\sqrt{\alpha^2 - \xi^2}} \int_{-\beta}^{\beta} \frac{\sqrt{\alpha^2 - \eta^2} P_1(\eta)}{(\eta^2 + 1)(\eta - \xi)} d\eta, \quad |\xi| < \alpha, \quad (5)$$

$$\text{де } h'_1(\xi) = \frac{dK}{2\pi^2\sqrt{\alpha^2 - \xi^2}(\xi^2 + 1)} \left[\sqrt{\alpha^2 + 1} (\pi p + 2\sigma_0 \Psi(\alpha, \chi)) \xi + \frac{\sigma_0}{2} \sqrt{\alpha^2 - \xi^2} (\Gamma(\alpha, \xi, \chi) - \Gamma(\alpha, \xi, -\chi)) \right],$$

$$P_1(\xi) = P(\xi) + \sigma_0, \Psi(\alpha, \chi) = \arctan\left(\frac{\chi\sqrt{\alpha^2 + 1}}{\sqrt{\alpha^2 - \chi^2}}\right), \Gamma(\alpha, \xi, \chi) = \ln \left| \frac{\alpha^2 - \chi\xi + \sqrt{(\alpha^2 - \xi^2)(\alpha^2 - \chi^2)}}{\alpha^2 - \chi\xi - \sqrt{(\alpha^2 - \xi^2)(\alpha^2 - \chi^2)}} \right|.$$

Оскільки

$$h'(\xi) = 0, |\xi| \leq \beta; \quad h(-\beta) = h(\beta) = 0, \quad (6)$$



для знаходження $P_1(\xi)$ отримаємо наступне СІР:

$$\int_{-\beta}^{\beta} \frac{\sqrt{\alpha^2 - \eta^2} P_1(\eta)}{(\eta^2 + 1)(\eta - \xi)} d\eta = -\frac{2\pi^2 \sqrt{\alpha^2 - \xi^2}}{dK} h_1'(\xi), \quad |\xi| < \beta, \quad (7)$$

розв'язок якого знайдено за допомогою методу колокацій [4].

Задовольнивши умови $h(-\beta) = 0$ та $h(-\chi) = h_0$, для знаходження ширини ділянки контакту та ширини зони адгезії отримано систему двох трансцендентних рівнянь, розв'язок якої знайдено числово.

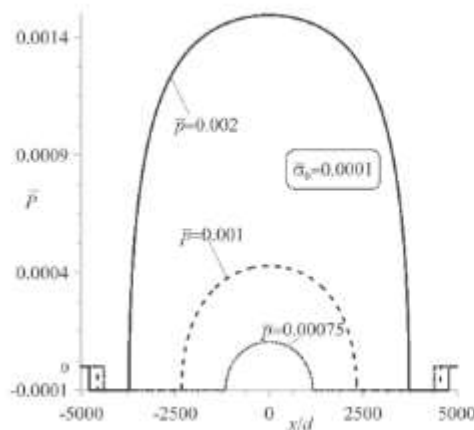


Рисунок 2 – Розподіл контактного тиску в межах виїмки

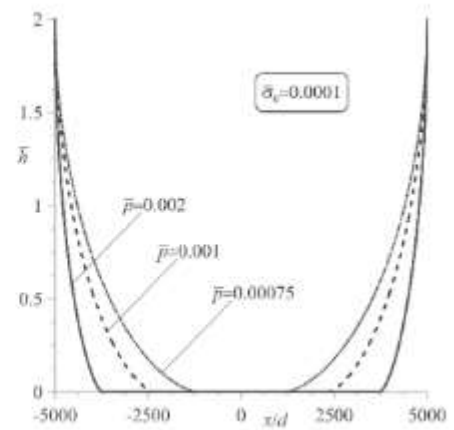


Рисунок 3 – Форма зазору

Рис. 2 ілюструє розподіл контактного тиску $\bar{P} = KP$ в межах виїмки, а рис. 3 – форму зазору для різних значень зовнішнього навантаження $\bar{p} = Kp$, сил адгезії $\bar{\sigma}_0 = K\sigma_0 = 0.0001$ та наступних геометричних параметрів текстури жорсткої основи: $a = 0.3d = 10^4 h_0$, $A = 2h_0$.

Контактний тиск досягає максимального значення в центрі ділянки контакту, рівний $-\bar{\sigma}_0$ на її кінцях та в зонах адгезії. Збільшення навантаження \bar{p} зумовлює збільшення контактного тиску, ширини ділянки контакту та закриття зазору між поверхнями тіл.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Berman, D., & Krim, J. (2013). Surface science, MEMS and NEMS: Progress and opportunities for surface science research performed on, or by, microdevices. *Prog. Surf. Sci.*, (88), 171–211.
2. Maugis, D. (1992). Adhesion of spheres: The JKR-DMT transition using a Dugdale model. *J. Colloid Interface Sci.*, (150), 243–269.
3. Chumak, K. (2016). Adhesive contact between solids with periodically grooved surfaces. *Int. J. Solids Structures*, (78–79), 70–76.
4. Golberg, M.A. (1990). *Numerical Solution of Integral Equations*. Springer Science+Business Media.

