

DOI: <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-35-08>
УДК 621.8

¹РЯБЧИКОВ М.Л., д.т.н., проф.
професор кафедри галузевого машинобудування
e-mail: mykola.riabchikov@lntu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9382-7562>

¹ПУЦЬ В.С., к.т.н., доц.
завідувач кафедри галузевого машинобудування
e-mail: vitaliy.puts@lntu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3164-6173>

¹МАРТИНЮК В.Л., к.т.н., доц.
доцент кафедри галузевого машинобудування
e-mail: gm@lntu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6914-2336>

¹Луцький національний технічний університет,
вул. Львівська, 75 м. Луцьк Волинська обл. 43018, Україна

АДГЕЗІЙНО – ПРУЖНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ МАШИНОБУДІВНИХ МАТЕРІАЛІВ В ЗВ'ЯЗКУ З ПОКАЗНИКАМИ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ

У статті розглянуто актуальне питання зниження коефіцієнта тертя в умовах сухого контакту між поверхнями машинобудівних деталей шляхом оптимізації параметрів шорсткості. На основі аналізу сучасних досліджень у сфері трибології встановлено, що традиційні підходи, орієнтовані на змазування, не є ефективними або можливими в низці високотехнологічних процесів, таких як вакуумна металізація, нанесення функціональних покриттів тощо. Тому пошук методів зниження тертя в умовах сухого контакту є особливо важливим для підвищення довговічності та енергоефективності елементів технічних систем. Основна увага в роботі приділена створенню математичної моделі, яка враховує як пружні деформації мікронерівностей поверхні, так і адгезійні взаємодії, що виникають у зоні контакту. Для опису згину мікронерівностей застосовано рівняння згину пластини, а для опису контактної взаємодії – класичну модель Герца. У результаті чисельного моделювання показано, що коефіцієнт тертя суттєво залежить від висоти R_a та середнього кроку S_m шорсткості, а також від параметрів матеріалів, що визначають їхню пружність і адгезійну здатність. Виявлено, що зі зміною геометричних параметрів мікронерівностей та властивостей матеріалів коефіцієнт тертя може мати як зростаючий, так і спадний характер. Найбільшу інженерну цінність має виявлення чітко вираженого мінімуму коефіцієнта тертя для певного поєднання параметрів шорсткості та матеріалів. Це відкриває можливості для свідомого проектування технологічних режимів обробки поверхонь з метою досягнення оптимальних характеристик тертя без застосування мастильних матеріалів. У статті наведено графічні залежності, що ілюструють поведінку коефіцієнта тертя в залежності від параметрів поверхні та рівня адгезії. Сформульовані теоретичні висновки можуть бути використані для вибору оптимальних значень шорсткості при конструюванні та виготовленні деталей машин, які працюють у вакуумі, біомедичних пристроях, а також в умовах обмеженого доступу до мастила. Автори також підкреслюють необхідність подальших досліджень для точного визначення коефіцієнтів адгезійної взаємодії (k_1 і k_2), а також уточнення ролі фактичної площі контакту, що може істотно впливати на силу тертя.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: конструктивні матеріали, тертя, шорсткість, пружність, адгезія

Як цитувати: Рябчиков М.Л., Пуць В.С., Мартинюк В.Л. Адгезійно – пружна модель визначення коефіцієнта тертя машинобудівних матеріалів в зв'язку з показниками шорсткості поверхні. *Машинобудування*. 2025. Вип. 35 С. 74-84. DOI: <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-35-08>



Вступ

Зниження коефіцієнта тертя в машинобудівних конструкціях є актуальним завданням, яке може знизити зношування, енергетичні та інші витрати. Якщо говорити про звичайне машинобудування, поверхні, що труться, зазвичай піддають мастилу. У таких випадках вивчення процесу тертя має гідралічну складову і залежно від в'язкості мастила та товщини мастильного шару моделювання таких процесів виробляють із залученням методів гідродинаміки. Ряд сучасних процесів, пов'язаних з обробкою матеріалів в умовах вакууму або спеціальних середовищ не надає можливості для застосування рідкого мастила. Прикладами таких процесів може бути вакуумна металізація полімерних плівок та інших виробів, нанесення голографічних покриттів та інші. При цьому виникає питання про призначення якості обробки поверхонь, що труться. Відомі фактори кажуть, що надто хороша обробка поверхні може у деяких випадках негативно впливати на показники сухого тертя. Вирішення задачі про вплив поверхні на показники тертя, таким чином, є актуальним завданням.

Питанням зв'язку шорсткості поверхні з показниками тертя присвячена певна частина наукових праць із трибології.

Основний стандарт, присвячений показникам шорсткості [1] вводить основні показники мікронерівностей, зокрема показник середньої висоти мікронерівностей R_a та середньої відстані між мікронерівностями S_m (рис. 1).

Як зазначається в [2], в даний час є досить великі вимірювальні можливості визначення параметрів шорсткості поверхонь контакту. У цій статті обґрунтовано модель контакту шорсткої поверхні. У роботі [3] розглянуто вплив шорсткості та інших умов деяких конкретних матеріалів. У статті, на жаль, не наводиться аналіз, який дозволить вибирати умови для найкращих показників тертя.

У статті [4] описано неоднозначний вплив параметрів шорсткості на показники тертя твердих поверхонь. Зокрема, зазначено, що коефіцієнт тертя може зменшуватися або збільшуватися залежно від пружних та адгезійних властивостей матеріалів.

Діяльність [5] показано вплив як величини шорсткості, і її напрями коефіцієнт тертя. Досліджувалися конкретні матеріали. На наш погляд, аналіз впливу різних факторів у цій роботі недостатній.

Стаття [6] обґрунтовує важливість зниження коефіцієнтів тертя як металевих, і неметалевих матеріалів з урахуванням шорсткості поверхні. Стаття [7] розглядає у цьому напрямі спеціальні матеріали для медичних цілей, які піддаються сухому тертю.

У статті [8] обговорюється раціональність використання різних показників шорсткості щодо процесу тертя. Робота [9] доводить використання показника середньої висоти шорсткості.

Деякі роботи аналізують вплив шорсткості на тертя, проте глибше їх вивчення призводить до висновку, що йдеться про тертя зі змащенням, тобто спостерігається відхід від моделі сухого тертя [10, 11].

Пропозиції щодо врахування пружних деформацій для визначення коефіцієнту тертя [12] не знайшли поки потужного розвитку. В дослідженні [13] вперше зроблена спроба врахувати одночасно пружні і адгезійні взаємодії в місці мікрошорстостей, що потенційно створює можливості для пошуку оптимальних параметрів, виходячи з мінімуму коефіцієнту тертя [14].

Мета даного дослідження – створення математичної моделі, що враховує пружні деформації і адгезійні взаємодії в умовах шорсткої поверхні для мінімізації коефіцієнту тертя.

Матеріали і методи

Для дослідження використовувались сталі марок 45 і 40Х, з обробкою до показників шорсткості 10-40мкм. Моделювання процесів тертя в таких матеріалах відбувалось на основі визначення пружних процесів в місцях сполучення поверхонь [15]. Процеси деформування визначались при врахуванні розподіленні контактних сил [16]. Враховуються реальні рівні деформацій і напружень [17]. З метою

оптимізації параметрів шорсткості обрані аналітичні методи моделювання з врахуванням можливості цифрового моделювання [18].

Модель деформування базується на базі аналізу випадкової геометрії нерівності поверхні. На рис. 1 наведена модельне сполучення мікрошорсткостей при ковзанні однієї поверхні по іншій. Також наведено розподілення сил в цьому процесі.

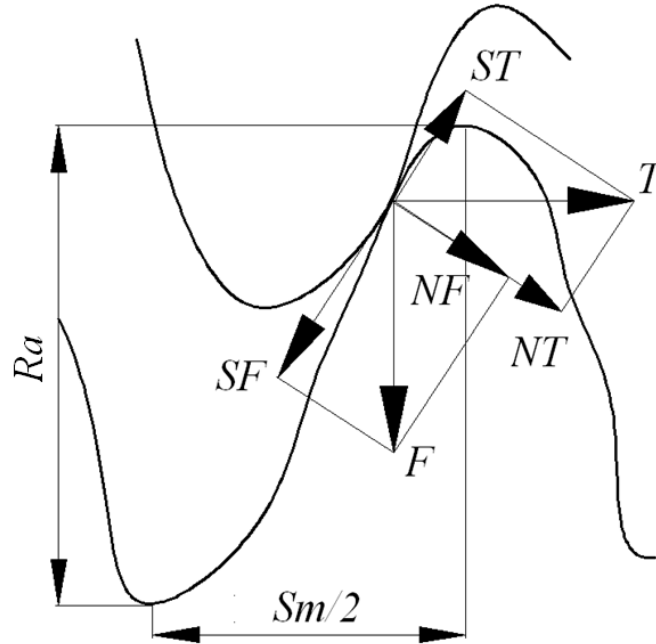


Рис.1 – Схема навантаження шорсткої поверхні

Fig. 1 – Rough surface loading diagram

Основними параметрами шорсткості буде висота нерівності Ra і середній крок між нерівностями Sm [19-20].

Кут нахилу профілю шорсткості можна визначити з умови

$$\varphi \approx \sin \varphi \approx \tan \varphi = \frac{Sm}{2Ra}.$$

В процесі ковзання двох поверхонь виникає дотична сила T і сила, нормальна до поверхні F .

З умов рівноваги сил можна знайти складові для використання в подальших розрахунках.

Тоді сила дотична до поверхні нерівності в зоні торкання

$$SF = F \cos \varphi = F \sqrt{1 - \frac{Sm^2}{4Ra^2}},$$

Складові сили, нормальна до поверхні нерівності, що викликається силою ковзання

$$NF = F \sin \varphi = F \frac{Sm}{2Ra},$$

Складові сили, дотична до поверхні нерівності, що викликається силою ковзання

$$ST = T \sin \varphi = T \frac{Sm}{2Ra},$$

Складові сили, нормальна до поверхні нерівності, що викликається силою ковзання

$$NT = T \cos \varphi = T \sqrt{1 - \frac{Sm^2}{4Ra^2}}.$$

Дані навантаження розглядаються з боку дії на шорсткості при їх згині і стисканні [21]. Контакти взаємодії при цьому розглядаються в деформаційній моделі Герца [22].

В подальших розділах сили опору ковзання між шорсткими поверхнями враховуються в умовах деформацій згину і стискання.

Результати

Процеси деформування пружних нерівностей.

В умовах деформування відбувається згин профілю шорсткості силою T (рис.2). В умовах створення мікронерівностей засобами лезвійних інструментів така поверхня має вигляд певного подовженого гребня. При дії дотичної сили шорсткість одержує

деформацію w . У таких умовах найбільш прийнятна модель згин пластини з товщиною, що дорівнює половині кроку шорсткості і висотою, що дорівнює висоті цієї шорсткості. Тут T визначає лінійне навантаження (розмірність Н/м)

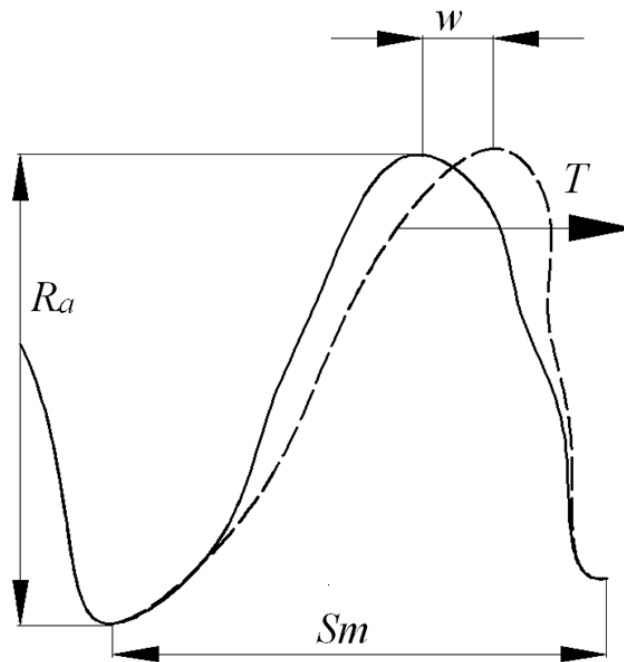


Рис.2 – Модель пружного деформування мікронерівності
Fig. 2 – Model of elastic deformation of micro-unevenness

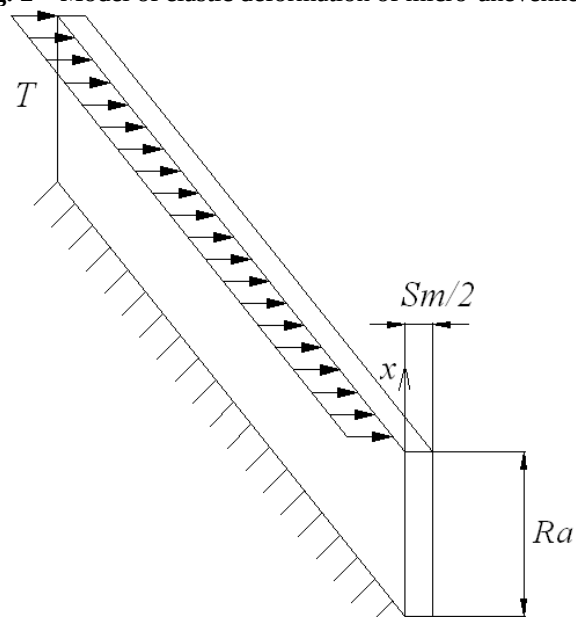


Рис.3 – Деформація в моделі довгої пластини
Fig. 3 – Deformation in the long plate model

Рівняння згину пластини може бути записане у вигляді

$$D \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = q,$$

де D – циліндрична жорсткість,

$$D = \frac{E \cdot Sm}{96(1 - \mu^2)},$$

E – модуль пружності, μ –

коефіцієнт Пуасона, q – навантаження по площині, в даному випадку $q=0$.

Розв'язок рівняння може бути представлено у вигляді полінома

$$w = C1 + C2 \cdot x + C3 \frac{x^2}{2} + C4 \frac{x^3}{6}.$$

Постійні інтегрування можна знайти з граничних рівнянь, прогин і кут повороту

перерізу ($\vartheta = \frac{\partial w}{\partial x} = 0$) в точці закріплення

дорівнює нулю. Ці умови дають значення двох постійних інтегрування $C1=C2=0$.

В точці закріплення відомий згинальний

$$\text{момент } M = Rz \cdot T = D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = D \cdot (C3 + C4 \cdot x)$$

$$\text{Ця умова дає } C3 = \frac{Rz \cdot T}{D}.$$

Також на кінці шорсткості відома поперечна сила

$$T = D \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} = D \cdot C4.$$

Тоді вираз для прогину може бути записаний у вигляді

$$w = \frac{T}{D} \left(Ra \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} \right),$$

$$\text{кут повороту } \vartheta = \frac{T}{D} \left(Ra \cdot x + \frac{x^2}{2} \right).$$

На кінці пластини кут повороту

$$\theta = \frac{3T \cdot Ra}{2D} = \frac{144T \cdot Ra \cdot (1 - \mu^2)}{E \cdot Sm}.$$

Тоді кут нахилу зміниться на величину

$$\varphi = \frac{Sm}{2Ra} + \frac{144T \cdot Ra \cdot (1 - \mu^2)}{E \cdot Sm}.$$

Сили ковзання можна знайти з залежностей

$$ST = T \left(\frac{Sm}{2Ra} + \frac{144T \cdot Ra \cdot (1 - \mu^2)}{E \cdot Sm} \right).$$

$$SF = F \sqrt{1 - \left(\frac{Sm}{2Ra} + \frac{144T \cdot Ra \cdot (1 - \mu^2)}{E \cdot Sm} \right)^2}.$$

Таким чином, знайдені значення сил ковзання мікронерівностей одна по одній з врахуванням їх пружних деформацій.

Контактні деформації в зоні мікронерівностей

В цій частині дослідження розглядалось стискання профілю контактними напруженнями. Ширина площини контакту виходячи з моделі контактної взаємодії Герца може бути знайдена з виразу

$$b = 2,15 \sqrt{\frac{(NF + NT) \cdot \rho}{E}}.$$

Сили стискання з врахуванням пружних деформацій, визначених в попередніх розрахунках, можуть бути записані і у вигляді

$$NF = F \left(\frac{Sm}{2Ra} + \frac{144T \cdot Ra \cdot (1 - \mu^2)}{E \cdot Sm} \right),$$

$$NT = T \sqrt{1 - \left(\frac{Sm}{2Ra} + \frac{144T \cdot Ra \cdot (1 - \mu^2)}{E \cdot Sm} \right)^2}.$$

Радіус кривини профілю визначимо з припущення тригонометричної функції профілю може бути визначений, як

$$y = Ra \cdot \cos \frac{\pi x}{Sm}.$$

В таких умовах кривина

профілю мікронерівностей може бути записана в диференційному і інтегральному вигляді

$$K = \frac{|y''|}{(1 + (y')^2)^{3/2}} = \frac{Ra \frac{\pi^2}{Sm^2} \cos \frac{\pi x}{Sm}}{\left(1 + Ra^2 \frac{\pi^2}{Sm^2} \left(\sin \frac{\pi x}{Sm} \right)^2 \right)^{3/2}}.$$

В верхній частині профілю при $x=0$ кривина

$$\text{дорівнює } K = \frac{\pi^2 Ra}{Sm^2}.$$

Радіус кривини

$$\text{профілю шорсткості дорівнює } \rho = \frac{Sm^2}{\pi^2 Ra}.$$

Тоді додається додаткова сила адгезії TT , що направлена відповідно до SF може бути визначена рівнянням

$$TT = k1 \sqrt{\frac{Sm^2}{Ra} \left(T \sqrt{1 - \left(\frac{Sm}{2Ra} + \frac{144T \cdot Ra \cdot (1 - \mu^2)}{E \cdot Sm} \right)^2} + F \left(\frac{Sm}{2Ra} + \frac{144T \cdot Ra \cdot (1 - \mu^2)}{E \cdot Sm} \right) \right)}$$

Параметр $k1$ визначає величину адгезійної взаємодії між стиснутими поверхнями. Величина цього параметру залежить від параметрів поверхневої енергії стиснутих матеріалів і повинна стати предметом подальших досліджень.

Означимо надалі $\xi = \frac{2Ra}{Sm}$. Тоді для різних сил можна записати спрощені вирази

$$ST = T \left(\frac{1}{\xi} + k2 \cdot T \cdot \xi \right), \quad SF = F \sqrt{1 - \left(\frac{1}{\xi} + k2 \cdot T \cdot \xi \right)^2},$$

$$TT = k1 \sqrt{Sm} \sqrt{\frac{1}{\xi} \left(T \sqrt{1 - \left(\frac{1}{\xi} + k2 \cdot T \cdot \xi \right)^2} + F \left(\frac{1}{\xi} + k2 \cdot T \cdot \xi \right) \right)}.$$

Коефіцієнт тертя в цих умовах можна записати у вигляді. Тут в рівнянні параметр ξ визначає розміри мікронерівностей (висоту і крок), параметри $k1$ і $k2$ параметри пружності і адгезійної міцності

$$f \approx \frac{\frac{1}{\xi} + k2' \cdot \xi}{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{\xi} + k2' \cdot \xi \right)^2} + k1' \sqrt{\frac{1}{\xi} \left(\frac{1}{\xi} + k2' \cdot \xi \right)}}$$

В залежності від параметрів адгезії можуть спостерігатися різні залежності коефіцієнту тертя від параметрів шорсткості.

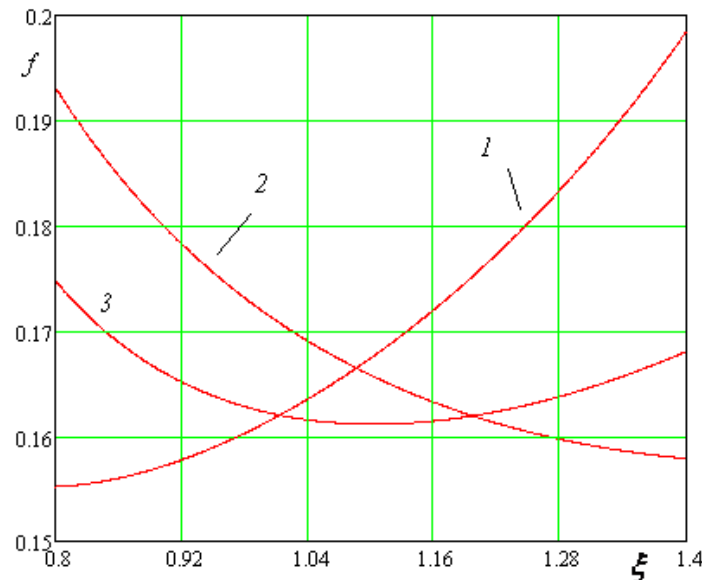


Рис.4 – Залежність коефіцієнту тертя від параметрів шорсткості при різних параметрах адгезії
Fig. 4 – Dependence of the friction coefficient on the hex parameters at different adhesion parameters

Результати моделювання показують, що в залежності від пружних і адгезійних властивостей коефіцієнт тертя при зміні показника шорсткості може збільшуватись (графік 1), зменшуватись (графік 2). Найбільший інтерес представляють матеріали, для яких виділяється яскраво виражений мінімум (графік 3). Такі матеріали дозволяють планувати технологічні параметри обробки поверхні з умови забезпечення мінімальних сил тертя.

На рис.5 показана залежність, що дозволяє визначити параметри шорсткості

для забезпечення мінімального коефіцієнта шорсткості.

Таким чином, можна стверджувати, що для певних адгезійних властивостей матеріалів існує мінімум коефіцієнта тертя. Цей факт визначає можливість призначення оптимальних параметрів шорсткості при конструюванні деталей зі взаємним ковзанням. Одночасно дана умова передбачає проведення подальших досліджень для визначення параметрів адгезії в залежності від площі контакту для основних конструкційних матеріалів.

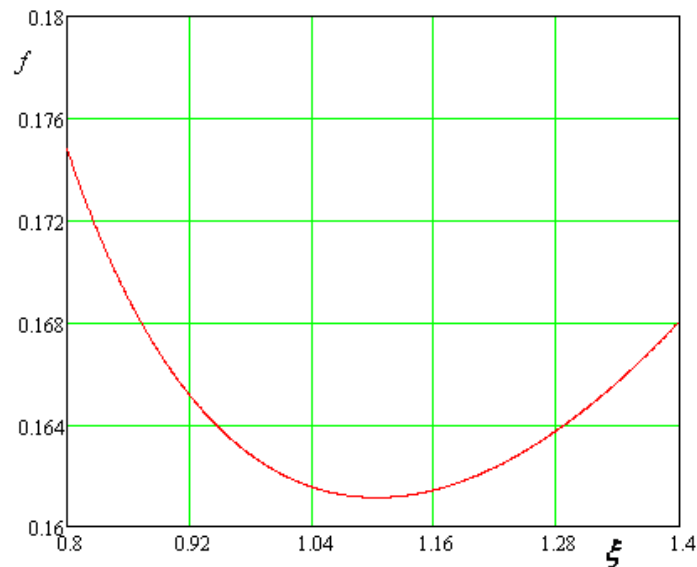


Рис.5 – Мінімум коефіцієнта тертя в залежності від параметрів шорсткості

Fig. 5 – Minimum friction coefficient depending on roughness parameters

Висновки

Проведене дослідження підтвердило значний вплив параметрів шорсткості поверхні (висоти R_a та середнього кроку S_m) на величину коефіцієнта тертя в умовах сухого контакту.

Розроблена математична модель, яка враховує пружні деформації та адгезійні взаємодії мікронерівностей, дозволяє якісно описати поведінку шорстких поверхонь при ковзанні. Зокрема, модель базується на класичних рівняннях згину пластини та контактній теорії Герца.

Моделювання показало, що залежно від матеріалів і їхніх адгезійно-пружних характеристик, коефіцієнт тертя може як зростати, так і зменшуватись зі зміною

параметрів шорсткості. Для деяких випадків спостерігається чітко виражений мінімум коефіцієнта тертя.

Наявність такого мінімуму дає змогу призначати оптимальні параметри шорсткості при проектуванні машинобудівних конструкцій, що працюють в умовах сухого тертя. Це відкриває можливості для зниження енергетичних витрат, зменшення зношування та підвищення довговічності деталей.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на експериментальне визначення параметрів адгезійної взаємодії (коефіцієнтів k_1 та k_2), а також вивчення впливу площі реального контакту на силу тертя для основних конструкційних матеріалів.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію

Список використаної літератури

1. ДСТУ ISO 4287:2012. Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структур. Видання офіційне. Київ, Мінекономрозвитку України, 2013, 16 с.
2. B Yunfei Li, Jiachun Lin, Huixu Song, Yunjin Xiang, Zhaoyao Shi, Ulf Olofsson, Local surface roughness of cylindrical gears: Concept, method, and application, *Tribology International*, 2025, Volume 207, 110637, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110637>.
3. Yufei Liang, Shengqiang Zhou, Huafeng Li, Lin Yang, A contact model based on multi-scale rough surface of ultrasonic motor, *Measurement*, 2025, Volume 249, 117025, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117025>.
4. Yan Feng, Xiu Jiang Shi, Xi Qun Lu, Wen Sun, Kun Peng Liu, Yun Fei Fei, Predictions of friction and wear in ball bearings based on a 3D point contact mixed EHL model, *Surface and Coatings Technology*, 2025, Volume 502, 131939, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2025.131939>.
5. Quan Gan, Xinyuan Zhang, Qiang Li, Jianye Chen, Fengshou Zhang, Zhen Zhong, Yunzhong Jia, Pengliang Yu, Mengke An, Derek Elsworth, Influence of roughness and slip velocity on the evolution of frictional strength, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2025, Volume 188, 106076, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2025.106076>.
6. Florea VA, Toderas M, Danciu C. The Influence of Roughness of Surfaces on Wear Mechanisms in Metal–Rock Interactions. *Coatings*. 2025; 15(2):150. <https://doi.org/10.3390/coatings15020150>
7. Alaci S, Lupascu C, Romanu I-C, Cerlinca D-A, Ciornei F-C. Some Aspects of the Effects of Dry Friction Discontinuities on the Behaviour of Dynamic Systems. *Computation*. 2024; 12(9):181. <https://doi.org/10.3390/computation12090181>
8. Guinea, A., Aginagalde, A., Tato, W. *et al.* Impact of surface roughness on the coefficient of friction of polymer-on-polymer contacts for deflection pulley-rope systems in the lift industry. *Friction*, 2024 **12**, 2126–2138. <https://doi.org/10.1007/s40544-024-0881-8>
9. X. Wang, F. Guo, F. Li, Z. Liu and J. Kou, "Influence of Surface Roughness of Sliding Friction Pairs on Pantograph–Catenary Contact Resistance," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 10, no. 4, pp. 10208–10218, Dec. 2024, doi: 10.1109/TTE.2024.3384022.
10. Trzepieciński T, Sz wajka K, Szewczyk M. Analysis of Coefficient of Friction of Deep-Drawing-Quality Steel Sheets Using Multi-Layer Neural Networks. *Lubricants*. 2024; 12(2):50. <https://doi.org/10.3390/lubricants12020050>
11. Hans Terwisscha-Dekker, Albert M. Brouwer, Bart Weber, Daniel Bonn, Elastic contact between rough surfaces: Bridging the gap between theory and experiment, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Volume 188, 2024, 105676, <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2024.105676>.
12. Ajinkya Pawar, Venkata Harish Babu Manne, Andrea Vacca, Manuel Rigosi, Analysis of torque efficiency of External Gear Machines considering gear teeth roughness, *Mechanism and Machine Theory*, Volume 199, 2024, 105675, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2024.105675>.
13. Keropyan, A.M., Albagachiev, A.Y. Study of the Main Factors Affecting the Increase in the Friction Coefficient of Interacting Surfaces of Rail Vehicles. *J. Mach. Manuf. Reliab.* **53**, 208–211, 2024. <https://doi.org/10.1134/S1052618824700055>
14. Sanoussi NS, Hammami M, Feki N, Belgasam T, Abbes MS, Haddar M. Utilizing design of experiments techniques to determine the optimal coefficient of friction in spur gears. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J*. 2024;238(5):500–520. doi:[10.1177/13506501231223073](https://doi.org/10.1177/13506501231223073)
15. Yang Z, Li W, Zheng X, Zhao M, Zhang Y. The Influence of Initial Surface Roughness on the Current-Carrying Friction Process of Elastic Pairs. *Materials*. 2025; 18(2):370. <https://doi.org/10.3390/ma18020370>
16. Qinghua Meng, Hengxu Song, Yunong Zhou, Xiaoming Liu, Xinghua Shi, Unifying linear proportionality between real contact area and load in rough surface contact, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Volume 196, 2025, 105975, <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2024.105975>.
17. Wang, C., Li, Y., Li, Y. *et al.* Coupling effect of large deformation and surface roughness on dynamic frictional contact behaviors of hyperelastic material. *Comput Mech* **75**, 455–473 (2025). <https://doi.org/10.1007/s00466-024-02513-0>
18. Vashishtha G, Chauhan S, Singh R, Singh M, Tejani GG. A Review of Numerical Techniques for Frictional Contact Analysis. *Lubricants*. 2025; 13(1):18. <https://doi.org/10.3390/lubricants13010018>

19. K. Murakami and T. Sakamoto, "System for Measuring Material Properties and Surface Roughness of Objects from Microscopic Images," 2024 *IEEE SENSORS*, Kobe, Japan, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/SENSORS60989.2024.10784849.
20. Lenzi, E., Farroni, F., Sakhnevych, A., Timpone, F., Genovese, A. (2024). Laboratory Linear Friction Tester: Design and Results. In: Ciulli, E., Ruggiero, A. (eds) Proceedings of ITS-IFTToMM 2024. ITS-IFTToMM 2024. Mechanisms and Machine Science, vol 160. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-62616-6_3
21. Varenberg, M. Modeling Contact of Rough Surfaces with Bearing Ratio Curves. *Tribol Lett* 72, 104, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11249-024-01896-8>
22. Teng Hu, Liangxi Xie, Junwen Chen, Zhenyu Huang, Jiaxin Wang, Numerical study on tribology properties of textured surfaces based on a new contact model, *Materials Today Communications*, Volume 40, 2024, 109969, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.109969>.

Стаття надійшла для редакції 22.04.2025

Стаття рекомендована до друку 23.05.2025

¹**RIABCHYKOV M.**, doctor of technical sciences, professor

Professor of department of department of industrial machinery engineering

e-mail: mykola.riabchikov@lntu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9382-7562>

¹**PUTS V.**, PhD., ass-prof.

Head of department of department of industrial machinery engineering

e-mail: vitaliy.puts@lntu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3164-6173>

¹**MARTYNIUK V.**, к.т.н., доц.

Assistant professor of department of department of industrial machinery engineering

e-mail: gm@lntu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6914-2336>

¹*Lutsk national technical university,
Lvivska str., 75 Lutsk, 43018, Ukraine*

ADHESIVE-ELASTIC MODEL OF DETERMINING THE FRICTION COEFFICIENT OF ENGINEERING MATERIALS IN CONNECTION WITH SURFACE ROUGHNESS INDICATORS

The article addresses the relevant issue of reducing the coefficient of friction under dry contact conditions between surfaces of mechanical components by optimizing surface roughness parameters. Based on an analysis of current research in the field of tribology, it is established that traditional approaches focused on lubrication are not effective or feasible in several high-tech processes such as vacuum metallization, application of functional coatings, and others. Therefore, the search for methods to reduce friction under dry contact conditions is particularly important for improving the durability and energy efficiency of technical systems. The study focuses on the development of a mathematical model that considers both the elastic deformation of surface microasperities and the adhesive interactions arising in the contact zone. To describe the bending of microasperities, a plate bending equation is used, while the Hertzian contact model is applied to describe the contact interaction. As a result of numerical modelling, it is shown that the coefficient of friction significantly depends on the surface roughness height (R_a) and average spacing (S_m), as well as on the material properties that determine their elasticity and adhesive behaviour. It is found that with changes in the geometric parameters of microasperities and the properties of the materials, the coefficient of friction can exhibit both increasing and decreasing trends. Of greatest engineering interest is the identification of a clearly defined minimum of the friction coefficient for a specific combination of surface roughness parameters and material characteristics. This creates opportunities for the intentional design of surface finishing technologies aimed at achieving optimal frictional performance without the use of lubricants. The article provides graphical dependencies illustrating the behavior of the friction coefficient as a function of surface parameters and adhesion level. The theoretical conclusions presented can be used to determine optimal roughness values when designing and manufacturing machine parts that operate in vacuum, biomedical devices, or environments with limited lubricant access. The authors also emphasize the need for further research aimed at determining the coefficients of adhesive interaction (k_1 and k_2), as well as refining the role of the actual contact area, which may significantly affect the frictional force.

KEYWORDS: *structural materials, friction, roughness, elasticity, adhesion*

In cites: Riabchikov M., Puts V., Martyniuk V. (2025). Adhesive-elastic model of determining the friction coefficient of engineering materials in connection with surface roughness indicators. *Engineering*, (35), 74-84. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-35-08> (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References

1. DSTU ISO 4287:2012. Tekhnichni vymohy do heometrii vyrobiv (GPS). Struktura poverkhni. Profilnyi metod. Terminy, vyznachennia poniat i parametry struktur. Vydannia ofitsiine. [DSTU ISO 4287:2012. Technical requirements for product geometry (GPS). Surface structure. Profile methods. Terms, definitions of concepts and parameters of structures. Official edition.] Kyiv, Minekonomrozvytku Ukrainy, 2013, 16.s. (in Ukraine)
2. B Yunfei Li, Jiachun Lin, Huixu Song, Yunjin Xiang, Zhaoyao Shi, Ulf Olofsson, Local surface roughness of cylindrical gears: Concept, method, and application, *Tribology International*, 2025, Volume 207, 110637, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110637>.
3. Yufei Liang, Shengqiang Zhou, Huafeng Li, Lin Yang, A contact model based on multi-scale rough surface of ultrasonic motor, *Measurement*, 2025, Volume 249, 117025, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117025>.
4. Yan Feng, Xiu Jiang Shi, Xi Qun Lu, Wen Sun, Kun Peng Liu, Yun Fei Fei, Predictions of friction and wear in ball bearings based on a 3D point contact mixed EHL model, *Surface and Coatings Technology*, 2025, Volume 502, 131939, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2025.131939>.
5. Quan Gan, Xinyuan Zhang, Qiang Li, Jianye Chen, Fengshou Zhang, Zhen Zhong, Yunzhong Jia, Pengliang Yu, Mengke An, Derek Elsworth, Influence of roughness and slip velocity on the evolution of frictional strength, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2025, Volume 188, 106076, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2025.106076>.
6. Florea VA, Toderas M, Danciu C. The Influence of Roughness of Surfaces on Wear Mechanisms in Metal–Rock Interactions. *Coatings*. 2025; 15(2):150. <https://doi.org/10.3390/coatings15020150>
7. Alaci S, Lupascu C, Romanu I-C, Cerlinca D-A, Ciernei F-C. Some Aspects of the Effects of Dry Friction Discontinuities on the Behaviour of Dynamic Systems. *Computation*. 2024; 12(9):181. <https://doi.org/10.3390/computation12090181>
8. Guinea, A., Aginagalde, A., Tato, W. *et al.* Impact of surface roughness on the coefficient of friction of polymer-on-polymer contacts for deflection pulley-rope systems in the lift industry. *Friction*, 2024 **12**, 2126–2138. <https://doi.org/10.1007/s40544-024-0881-8>
9. X. Wang, F. Guo, F. Li, Z. Liu and J. Kou, "Influence of Surface Roughness of Sliding Friction Pairs on Pantograph–Catenary Contact Resistance," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 10, no. 4, pp. 10208–10218, Dec. 2024, doi: 10.1109/TTE.2024.3384022.
10. Trzepieciński T, Sz wajka K, Szewczyk M. Analysis of Coefficient of Friction of Deep-Drawing-Quality Steel Sheets Using Multi-Layer Neural Networks. *Lubricants*. 2024; 12(2):50. <https://doi.org/10.3390/lubricants12020050>
11. Hans Terwisscha-Dekker, Albert M. Brouwer, Bart Weber, Daniel Bonn, Elastic contact between rough surfaces: Bridging the gap between theory and experiment, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Volume 188, 2024, 105676, <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2024.105676>.
12. Ajinkya Pawar, Venkata Harish Babu Manne, Andrea Vacca, Manuel Rigosi, Analysis of torque efficiency of External Gear Machines considering gear teeth roughness, *Mechanism and Machine Theory*, Volume 199, 2024, 105675, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2024.105675>.
13. Keropyan, A.M., Albagachiev, A.Y. Study of the Main Factors Affecting the Increase in the Friction Coefficient of Interacting Surfaces of Rail Vehicles. *J. Mach. Manuf. Reliab.* **53**, 208–211, 2024. <https://doi.org/10.1134/S1052618824700055>
14. Sanoussi NS, Hammami M, Feki N, Belgasam T, Abbes MS, Haddar M. Utilizing design of experiments techniques to determine the optimal coefficient of friction in spur gears. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J*. 2024;238(5):500-520. doi:[10.1177/13506501231223073](https://doi.org/10.1177/13506501231223073)
15. Yang Z, Li W, Zheng X, Zhao M, Zhang Y. The Influence of Initial Surface Roughness on the Current-Carrying Friction Process of Elastic Pairs. *Materials*. 2025; 18(2):370. <https://doi.org/10.3390/ma18020370>
16. Qinghua Meng, Hengxu Song, Yunong Zhou, Xiaoming Liu, Xinghua Shi, Unifying linear proportionality between real contact area and load in rough surface contact, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Volume 196, 2025, 105975, <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2024.105975>.
17. Wang, C., Li, Y., Li, Y. *et al.* Coupling effect of large deformation and surface roughness on dynamic frictional contact behaviors of hyperelastic material. *Comput Mech* **75**, 455–473 (2025). <https://doi.org/10.1007/s00466-024-02513-0>

18. Vashishtha G, Chauhan S, Singh R, Singh M, Tejani GG. A Review of Numerical Techniques for Frictional Contact Analysis. *Lubricants*. 2025; 13(1):18. <https://doi.org/10.3390/lubricants13010018>
19. K. Murakami and T. Sakamoto, "System for Measuring Material Properties and Surface Roughness of Objects from Microscopic Images," 2024 *IEEE SENSORS*, Kobe, Japan, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/SENSORS60989.2024.10784849.
20. Lenzi, E., Farroni, F., Sakhnevych, A., Timpone, F., Genovese, A. (2024). Laboratory Linear Friction Tester: Design and Results. In: Ciulli, E., Ruggiero, A. (eds) Proceedings of ITS-IFTToMM 2024. ITS-IFTToMM 2024. Mechanisms and Machine Science, vol 160. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-62616-6_3
21. Varenberg, M. Modeling Contact of Rough Surfaces with Bearing Ratio Curves. *Tribol Lett* 72, 104, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11249-024-01896-8>
22. Teng Hu, Liangxi Xie, Junwen Chen, Zhenyu Huang, Jiaxin Wang, Numerical study on tribology properties of textured surfaces based on a new contact model, *Materials Today Communications*, Volume 40, 2024, 109969, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.109969>.

The article was received by the editors 04/22/2025

The article is recommended for printing 05/23/2025