

Р. М. МАРЧУК, Р. Г. МНАЦАКАНОВ

Національний авіаційний університет, Україна

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ШОРСТКОСТІ МІКРОРЕЛЬЄФУ ПОВЕРХНІ ПОЛІМЕРІВ

Проаналізовано результати функціональних мікрогеометричних параметрів профілю поверхні після серії експериментів для полімерного матеріалу Zedex zx-100k при різних швидкостях ковзання. Дослідження поверхневих характеристик матеріалів проводилось з застосуванням лазерного скануючого диференційно-фазового мікроскопу-профілометра. Проаналізовано показники кривої Аббота та визначено кінетику зміни параметрів шорсткості поверхні, зокрема середнє арифметичне відхилення профілю, пікову висоту шорсткості, глибину западин. Визначено оптимальну швидкість ковзання пари тертя полімер-сталь, при якій спостерігається найвищий рівень згладжування мікронерівностей, що сприяє покращенню трибологічних характеристик контакту за рахунок пружньо-пластичної деформації полімеру та процесам самозмащування.

Ключові слова: мікрогеометричні характеристики, шорсткість, полімери, швидкість ковзання.

Вступ та постановка задачі дослідження. У зв'язку з поширеним застосуванням полімерних матеріалів у різних галузях промисловості та техніки, важливо досліджувати їхні властивості та зміни під час експлуатації. Одним із ключових аспектів є вивчення зносостійкості полімерів при різних умовах, зокрема при різних швидкостях ковзання. У цьому контексті проведено дослідження впливу швидкості ковзання на мікрорельєф та зносостійкість полімерних матеріалів.

Адсорбція на поверхнях з більшою шорсткістю відбувається легше [1]. Таким чином, шорстка поверхня (контртіло) може адсорбувати полімер, тоді як гладка поверхня з того самого матеріалу цього не робить. Отже, шорсткість може суттєво змінити взаємодію між полімером і поверхнею [2].

Трибопари між полімером та сталлю характеризуються високими механічними властивостями, проявляють високу зносостійкість та ефективні антифрикційні характеристики, здатні до самозмащувальних ефектів завдяки властивостям полімерів, що робить їх ефективними для застосування в умовах значних механічних навантажень. Полімери також забезпечують стійкість до корозії, знижуючи потребу в додатковому мастильному матеріалі і забезпечуючи тривалий термін служби. Така комбінація матеріалів широко використовується в автомобільній, авіаційній, медичній та інших галузях, де важлива висока надійність і економічна ефективність [3].

Вивчення мікрорельєфу поверхні полімерних матеріалів є важливим для розуміння їхніх експлуатаційних властивостей, таких як зносостійкість, антифрикційність, змащувальна здатність та взаємодія з іншими матеріалами. Серед методів оцінки мікрогеометричних параметрів поверхні, оптичні профілометри дозволяють отримувати високоточні тривимірні зображення поверхні з роздільною здатністю на мікро- та нанорівні. Це дає змогу детально аналізувати мікрорельєф та виявляти найменші зміни на поверхні полімерів після трибологічних тестувань. На відміну від контактних методів вимірювання,

оптичні методи не впливають на поверхню зразка, що особливо важливо для дослідження м'яких полімерних матеріалів, які можуть бути пошкоджені при контакті з вимірювальним інструментом. Оптичні методи дозволяють створювати тривимірні моделі поверхні, що дає можливість більш повного та детального аналізу; дають змогу вимірювати та аналізувати різноманітні параметри шорсткості поверхні, такі як середнє арифметичне відхилення профілю (R_a), пікову висоту шорсткості (R_{pk}), глибину западин (R_{vk}) та інші. Це створює можливість комплексно оцінювати якість поверхні та її кінетику зміни.

Таким чином, використання перспективних оптичних методів дослідження є необхідним інструментом для детального та точного аналізу експериментально отриманих зразків мікрорельєфу поверхні полімерних матеріалів, що забезпечує глибше розуміння їхньої поведінки та властивостей у процесі експлуатації.

Аналіз останніх публікацій з даної проблеми. Застосування полімерних зносостійких матеріалів для підшипників ковзання надає їм перевагу за наявності в зоні контакту полімерної плівки з низьким опором зсуву. Цим пояснюється зниження коефіцієнта тертя. Трибоспрямлення матеріалів в процесі експлуатації в присутності полімеру супроводжується процесами взаємодії продуктів механічного руйнування з поверхнею металу. В результаті цих взаємодій утворюються полімерно-металічні сполуки, які також захищають контактні поверхні трибосплавлених зразків і деталей від адгезійної взаємодії [4]. Крім того, в зоні тертя зменшується кількість продуктів зношування між поверхнями тертя, оскільки полімер поглинає їх з поверхні тертя, що також впливає на зниження інтенсивності зношування та коефіцієнта тертя.

Ефективність визначення показників кривої Аббота в трибологічній оцінці поверхні стає очевидною при дослідженні поверхонь в процесі експлуатації: ці поверхні можуть мати однакові R_a , але різні криві Аббота, як зазначено в роботі [5] при оцінці композитів PTFE + скловолокно для підшипників. Причинами цих відмінностей можуть бути різні форми нерівностей, їх розподіл по висоті, а також діапазони між ними. Вивчення кривих Аббота контактних поверхонь після роботи на лабораторних моделях виявляє деякі специфічні тенденції, які можуть бути пов'язані з іншими трибологічними параметрами, такими як знос і коефіцієнт тертя, і вони можуть рекомендувати діапазон навантаження, швидкості або їх комбінацію для реальних умов експлуатації.

Однією з переваг кривих Аббота є те, що вони моделюють вплив зносу або припрацювання, надаючи інформацію про матеріал і об'єм пустот топографії поверхні, про швидкість пошкодження поверхневого шару, про несучу здатність і здатність до утримання мастильного матеріалу [6]. Встановлено [7], що під час випробування температура поверхні полімерного матеріалу підвищилася на 5–15 % через збільшення шорсткості поверхні (1,9–4,1 мкм). Також збільшення шорсткості поверхні призводить до зростання коефіцієнту тертя з 0,38 до 0,45 для обраних умов випробування.

У роботі [8] представлено метод визначення зносостійкості полімерних матеріалів в умовах інтенсивного тертя з використанням геометричної структури поверхні, сформованої під час випробувань, для визначення трибологічних властивостей матеріалів. Встановлено, що характеристики змащення та зносу безпосередньо пов'язані з геометричною структурою поверхонь тертя. Загальне поняття «якість поверхні» можна описати як

сукупність властивостей, набутих поверхневим шаром у процесі формування. Якість поверхні деталей машин впливає на такі експлуатаційні властивості, як контактна втома, зношування, ерозійна стійкість та ін. Шорсткість поверхні, структура матеріалу, фізико-хімічно-механічні властивості верхнього шару та загальне напруження можуть визначати стан (якість) поверхонь деталей машин і можуть розглядатися в початковому та робочому (експлуатаційному) стані [9].

У період експлуатації підшипників відбувається інтенсивне місцеве зношування робочих поверхонь його деталей. Поверхні тертя набувають геометричну форму та шорсткість, які найкраще відповідають конкретним умовам експлуатації [10]. При цьому виникають підвищені контактні напруження, що викликає термічні процеси в поверхневому шарі матеріалу та зниження його фізико-механічних властивостей. Але якщо забезпечити оптимальну початкову мікрогеометрію профілю та фізико-механічні властивості поверхневого шару, то скорочується період припрацювання та момент набуття стабільного робочого стану.

Таким чином, аналіз мікрогеометричних показників контактних поверхонь є важливим етапом щодо прогнозування їх терміну служби.

Метою роботи. Метою даного дослідження є оцінка впливу зміни швидкості ковзання на мікрорельєф та зносостійкість полімерних матеріалів. Для досягнення цієї мети були поставлені такі задачі:

- провести трибологічне тестування полімерних зразків на трибометричній машині за сталих параметрів, при трьох швидкостях ковзання;
- отримати зразки дослідження після трибологічного тестування та провести оцінку їх мікрогеометричних параметрів за допомогою оптичного профілографа з двома скануючими лазерами [11];
- визначити вплив швидкості ковзання на мікрорельєф та зносостійкість полімерів.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження виконувалось для матеріалу Zedex zx-100k виробництва ТМ ZEDEX. Полімер Zedex представляє собою серію полімерних матеріалів, виготовлених на основі PEI, PEEK та PET. Завдяки кристалічній та однорідній структурі, цей пластик має еластичність, що перевершує більшість аналогічних матеріалів. Даний матеріал відрізняється більшою зносостійкістю, ніж фторопласт [12]. Для дослідження впливу швидкості ковзання на зносостійкість полімерних матеріалів було проведено серію експериментів на трибометричній машині при трьох різних режимах швидкості: 1.4, 2.8 та 5.5 м/с. Випробування дозволили оцінити поведінку матеріалів під впливом різних умов тертя, що є важливим для розуміння їх функціональних характеристик у реальних експлуатаційних умовах. Одна пара зразків залишалася контрольною та не тестувалася на машині тертя, що забезпечило можливість порівняння змін шорсткості поверхонь зразків після тестування. Кожен режим швидкості відтворювався для інтервалу часу 75 хв, після чого проводився аналіз поверхонь зразків, що дозволило виявити закономірності в їх зношуванні та зміну структурних властивостей.

Контртіло виготовлено із сталі 30ХГСА (HRC = 43; Ra = 0.37 мкм). Сталь 30ХГСА характеризується високою міцністю та ефективними механічними характеристиками завдяки вмісту хрому, марганцю та кремнію. Завдяки наявності хрому, сталь має підвищену корозійну стійкість, що дозволяє використовувати її в агресивних середовищах.

Сканування зразків проводилося в межах квадрата розміром 256 мкм × 256 мкм. Цей розмір обрано для забезпечення детального аналізу мікроструктури поверхні.

Параметри профілю мікрорельєфу поверхні визначалися відповідно до міжнародного стандарту DIN 4776 [13], що дозволяє отримати комплексні дані про топографію поверхні. Цей стандарт включає вимірювання різних параметрів шорсткості та хвилястості поверхні, які є критично важливими для оцінки якості обробки та триботехнічних властивостей матеріалів.

Для забезпечення точності вимірювань зразки були ретельно очищені перед скануванням. Процес сканування виконувався у кілька етапів, що дозволило мінімізувати можливі похибки, досягнути високого ступеня відтворюваності та отримати надійні результати.

Результати проведених експериментів дозволяють детально оцінити вплив різних режимів швидкості ковзання на зносостійкість полімерних матеріалів у трибопарах зі сталлю 30ХГСА. Для даних досліджень використано лазерний скануючий диференційно-фазовий мікроскоп-профілометр. Тривимірні профілі поверхонь (рис.1) зразків використовувалися для подальшого аналізу та порівняння з контрольними зразками, що не піддавалися обробці на трибометричній машині. На рисинку нжче наведені тривимірні мікрофотографії поверхонь, контрольного зразка, що не піддавався тестуванню, а також зразків, що зазнали нормального та високошвидкісного режимів роботи. Таке порівняння дозволяє чітко побачити зміни поверхонь, виникнення дефектів та деформацій, що з'являються внаслідок підвищених швидкостей ковзання.

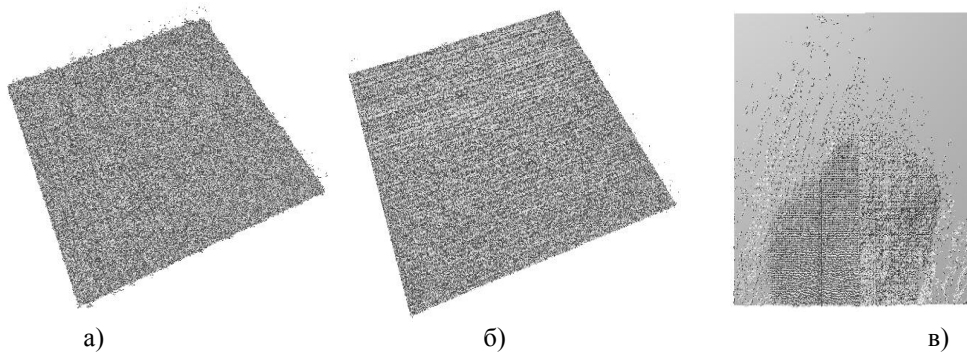


Рис.1. Тривимірні моделі поверхонь зразків: а – контрольний зразок (вихідна поверхня), б – поверхня після тертя при швидкості ковзання 2.8 м/с, в – поверхня після тертя при швидкості ковзання 5.5 м/с.

Як видно з рис. 1(а), на поверхні залишилися сліди від обробки матеріалу при виготовленні зразків. Рисунок 1(б) демонструє оптимальну робочу поверхню зразка, де мікронерівності згладжені завдяки пластичності полімеру та ефекту самозмащення пари тертя. Така поверхня є найкращим прикладом оптимальної роботи, оскільки рівномірно згладжена поверхня з мінімальними дефектами сприяє стабільності та ефективності тертя, знижуючи зношування та підвищуючи експлуатаційні характеристики. На рис. 1(в) видно, що поверхня має оплавленості, вирви та деформації, спричинені перегріванням полімеру при високій швидкості ковзання.

Варіація параметру R_{\max} у серії дослідів при різних швидкостях ковзання свідчить про зміну шорсткості поверхні залежно від швидкості ковзання. Максимальна висота профілю є ключовим параметром, що характеризує найбільшу нерівність на поверхні матеріалу.

Для контрольного зразка значення R_{\max} становило 0.35 мкм, що відображає початкову шорсткість поверхні без впливу ковзання але із слідами методу обробки матеріалу. При першому режимі швидкості, згідно таб.1 значення R_{\max} знизилося до 0.13 мкм, що вказує на зменшення шорсткості поверхні в результаті більш ефективного вирівнювання мікронерівностей за рахунок мікропластичної деформації в трибоконтаті.

Таблиця 1

Функціональні параметри профілю шорсткості мікрорельєфу поверхні

Параметри профілю шорсткості поверхні	Zedex Контрольний	Zedex 1.4 м/с	Zedex 2.8 м/с	Zedex 5.5 м/с.
R_{pk} – середня арифметична висота виступів верхньої частини профілю, мкм	0.047	0.007	0.006	0.022
R_k – середня арифметична глибина серцевини мікронерівностей профілю, мкм	0.018	0.013	0.008	0.018
Rvk – середня арифметична глибина впадин профілю, мкм	0.05	0.008	0.005	0.02
R_a – середнє арифметичне відхилення профілю, мкм	0.015	0.006	0.003	0.008
$Mg1$ – співвідношення матеріалу, що визначає верхню межу шорсткості серцевини,	25	12.9	10.6	19.4
$Mg2$ – співвідношення матеріалу, що визначає нижню межу шорсткості серцевини,	25	15.7	9.7	18.3
R_{\max} – найбільша висота профілю, мкм	0.35	0.13	0.1	0.25
Центральна частина середньої відносної опорної довжини профілю, %	47	59	71	37

Другий режим, який був визначений як оптимальний, показав ще нижче значення R_{\max} (0.1 мкм), що свідчить про найкращу змашувальну дію та пластичну деформацію полімеру, що забезпечує максимально гладку поверхню.

При занадто високій швидкості ковзання значення R_{\max} зросло до 0.25 мкм. Це може бути пов'язано з термічним ефектом та збільшенням зношування, що спричинило оплавлення і дефекти на поверхні, збільшуючи її шорсткість.

Варіація параметру центральної частини середньої відносної опорної довжини профілю надає додаткове уявлення про те, як змінюється контактна поверхня під впливом різних режимів ковзання. Цей параметр відображає частку площі поверхні, яка бере участь у контактних взаємодіях (рис. 2).

Для контрольного зразка значення цього параметру становило 47%. Це відображає початкову опорну здатність поверхні без впливу ковзання. При першій швидкості ковзання значення параметру підвищилося до 59%. Це вказує

на покращення розподілу навантаження по поверхні за рахунок зменшення шорсткості та вирівнювання мікронерівностей. Така зміна свідчить про більш ефективний контакт і зменшення локальних напружень. Оптимальний режим ковзання показав найбільше значення параметру - 71%. Це свідчить про найкращий контактний стан поверхні, де значна частина поверхні бере участь у взаємодії та забезпечує гладку поверхню та рівномірний розподіл навантаження. При занадто високій швидкості ковзання значення параметру різко знизилася до 37%, що є наслідком значного погіршення контактної поверхні і може бути спричинено перегрівом, оплавленням та утворенням дефектів. Таке зниження параметру свідчить про зменшення ефективної контактної площі та збільшення локальних напружень, що призводить до руйнування поверхні.

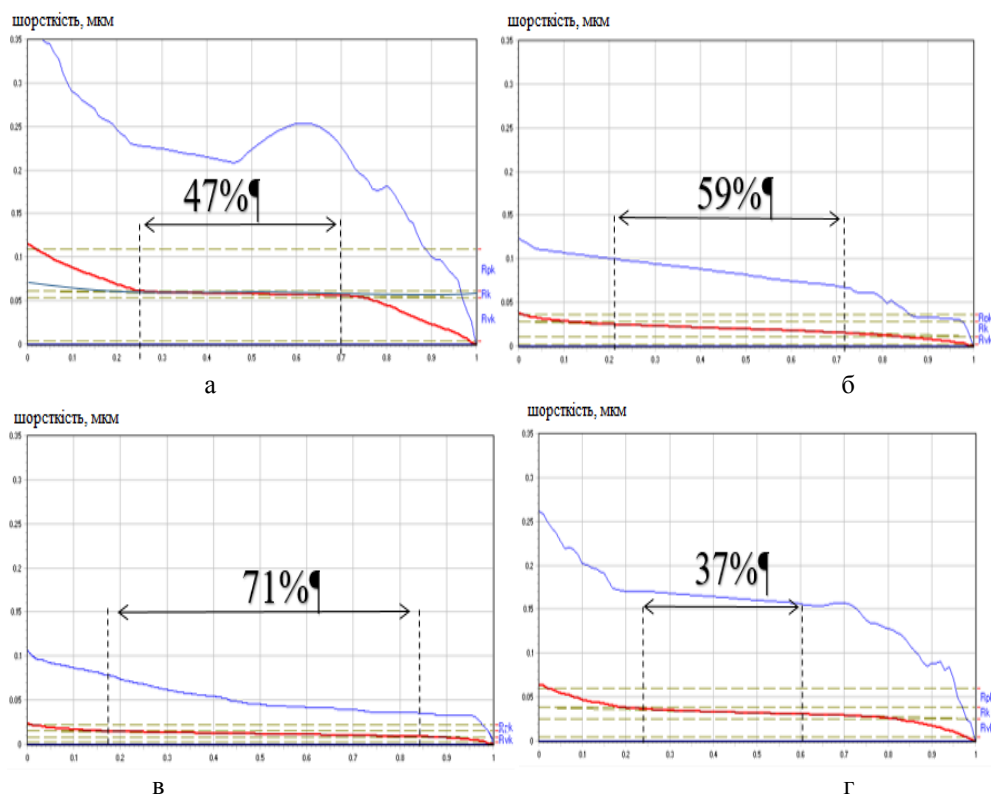


Рис. 2. Оцінка мікрорельєфу поверхні полімеру Zedex zx-100k: а- контрольний зразок, поверхня після тертя при швидкості ковзання 1.4 м/с (б), 2.8 м/с (в) та 5.5 м/с (г).

Закономірність зміни параметру R_a демонструє, як середня шорсткість поверхні змінюється під впливом різних швидкостей ковзання. Контрольний зразок мав значення R_a 0.015 мкм, що вказує на початкову шорсткість поверхні рис. 3(а). При першій швидкості ковзання значення R_a зменшилося до 0.006 мкм, засвідчуючи про вирівнювання мікронерівностей. Оптимальна швидкість ковзання забезпечила найнижче значення R_a 0.003 мкм, що вказує на найгладкішу поверхню. При занадто високій швидкості ковзання значення R_a зросло до 0.008 мкм, що свідчить про погіршення стану поверхні через перегрів, оплавлення та утворення дефектів.

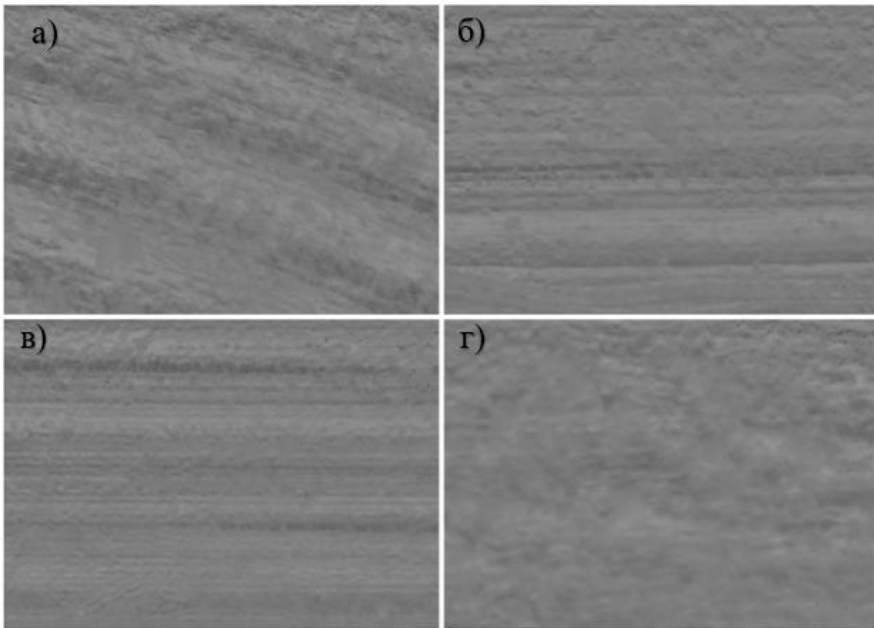


Рис. 3 Мікрофотографії рельєфу поверхні зразків полімеру при різних швидкостях ковзання: а- контрольний зразок, б - 1.4 м/с, в - 2.8 м/с та г - 5.5 м/с.

Висновки. Аналіз параметрів мікрорельєфу поверхні полімеру Zedex zx-100k при різних швидкостях ковзання дозволяє оцінити стан контактної поверхні. Оптимальний режим ковзання забезпечує найкращий розподіл навантаження та максимальну опорну здатність поверхні. Зокрема, при швидкості 2.8 м/с спостерігається найвищий рівень згладжування мікронерівностей, що сприяє покращенню трибологічних характеристик завдяки поєднанню пластичної деформації полімеру та самозмащування.

Водночас, занадто висока швидкість ковзання (5.5 м/с) призводить до руйнування поверхні та зменшення контактної площі. Це проявляється у збільшенні шорсткості через термічні та механічні пошкодження, що погіршує якість поверхні. Варіювання параметру R_{max} підтверджує цю закономірність: оптимальна швидкість ковзання сприяє зменшенню шорсткості, тоді як надмірно висока швидкість викликає її збільшення.

Таким чином, оптимальний режим ковзання забезпечує найкращу гладкість поверхні, сприяє зниженню тертя та зношування, а також підтримує довготривалу ефективність роботи матеріалу. Вибір надмірно високої швидкості ковзання, навпаки, веде до збільшення шорсткості, появи дефектів та погіршення трибологічних властивостей. Ці висновки підкреслюють важливість правильного підбору умов експлуатації для досягнення максимальних показників ефективності та довговічності матеріалів у трибологічних системах.

Список літератури

1. Jack Douglas. «How Does Surface Roughness Affect Polymer-Surface Interactions», 1989, С. 3707-3716.
2. Smith J., Brown P. Analysis of polymer composite materials for sliding bearings. Tribology International, 2022, 145, С. 23-29.

3. Lee Y., Kim S. Tribological properties of polymer composites. *Wear*, 2021, 484-485, C. 152-159.
4. Aulin, V., Lysenko, S., Hrynkiv, A., Tykhyi, A., Kuzyk, O., & Livitskyi, O. The regularity of the change in the coefficient of friction of the coupling of "shaft-sleeve" parts using polymeric materials. *Problems of Tribology*. 2023. 28(1/107), 81–91. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-107-1-81-91>
5. Tomescu L., Ripa M., Georgescu C. Analysing Abbott Curve for Composites with Polymeric Matrix and Fibbers. *Tribology in Industry*. 2001. Vol. 23, Iss. 3-4. P. 65-74
6. W. Grzesik, T. Wanat. Comparative assessment of surface roughness produced by hard machining with mixed ceramic tools including 2D and 3D analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. 169(3). P. 364–371. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.04.080
7. Mertens A., Kumar P., Senthilvelan S. The effect of the mating gear surface over the durability of injection-molded polypropylene spur gears. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2016. 230(12). P.1401-1414. doi:10.1177/1350650116635423
8. Musiał J, Horiashchenko S, Polasik R, Musiał J, Kałaczyński T, Matuszewski M, Śrutek M. Abrasion Wear Resistance of Polymer Constructional Materials for Rapid Prototyping and Tool-Making Industry. *Polymers*. 2020. 12(4). 873. <https://doi.org/10.3390/polym12040873>
9. Zakalov O.V. *Fundamentals of Friction and Wear in Machines*. TNTU Publishing House I. Pulyuya: Ternopil, Ukraine, 2011. 322p.
10. Tkachuk A., Zabolotnyi O., Chetverzhuk T., Svirzhevskiy K., Kononenko A. Increasing the Wear Resistance of the Friction Surfaces of Rotating Parts Made of Bearing Steels Through Hardening Processing Methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. 1060. 012025 doi:10.1088/1757-899X/1060/1/012025
11. <https://www.directindustry.com/industrial-manufacturer/laser-profilometer-104787.html> (дата звернення 12.05.2024)
12. <https://www.zedex.com.ua/uk/zedex-ua/zedex-100-ua/>. (дата звернення 15.05.2024)
13. DIN 4776:1990-05. Measurement of surface roughness. 1990. 7с.

Стаття надійшла до редакції 30.05.2024

Марчук Роман Миколайович – аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 068 832 39 56 E-mail: 4629663@stud.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2019-0609>

Мнацаканов Рудольф Георгійович – д. техн. наук, професор, професор кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 76 70, Email: mnatsakanov@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5035-2432>

R.M. MARCHUK, R. G. MNATSAKANOV

ANALYSIS OF THE MAIN FUNCTIONAL PARAMETERS OF POLYMER SURFACE MICRORELIEF ROUGHNESS

The results of the functional parameters of the surface roughness profile after a series of experiments for a single material at different sliding speeds have been analyzed. The study of surface characteristics of materials is of great importance for understanding their behavior and properties under various operating conditions. It is especially important to analyze the roughness parameters after experiments in different modes, as this allows for an understanding of how the surface condition and its interaction with other elements change under different load conditions. Using an optical profilometer for this study provides detailed information about the microstructure of the surface and allows for an objective assessment of changes in its parameters after changes in modes. Given the widespread application of polymeric materials in various industries and engineering fields, it is crucial to investigate their properties and changes during operation. One of the key aspects is studying the wear resistance of polymers under different conditions, particularly at various sliding speeds. In this context, research has been conducted on the impact of sliding speed on the microrelief and wear resistance of polymer materials. Adsorption on surfaces with greater roughness occurs more easily. Thus, a rough surface (counterbody) can adsorb a polymer, whereas a smooth surface of the same material does not. Consequently, roughness can significantly alter the effective interaction between the polymer and the surface.

Tribological pairs between polymers and 30KhGSA steel combine the high mechanical properties and wear resistance of steel with the low friction coefficient and self-lubricating properties of polymers, making them effective for use under significant mechanical loads. Polymers also provide corrosion resistance, reducing the need for additional lubrication and ensuring a longer service life. This combination of materials is widely used in the automotive, aerospace, medical, and other industries where high reliability and cost-effectiveness are essential.

Keywords: micro-geometric characteristics, roughness, polymers, sliding speed.

References

1. Jack Douglas. «How Does Surface Roughness Affect Polymer-Surface Interactions», 1989, C. 3707-3716.
2. Smith J., Brown P. Analysis of polymer composite materials for sliding bearings. Tribology International, 2022, 145, C. 23-29.
3. Lee Y., Kim S. Tribological properties of polymer composites. Wear, 2021, 484-485, C. 152-159.
4. Aulin, V., Lysenko, S., Hrynkiv, A., Tykhyi, A., Kuzyk, O., & Livitskyi, O. The regularity of the change in the coefficient of friction of the coupling of "shaft-sleeve" parts using polymeric materials. Problems of Tribology. 2023. 28(1/107), 81–91. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-107-1-81-91>
5. Tomescu L., Ripa M., Georgescu C. Analysing Abbott Curve for Composites with Polymeric Matrix and Fibbers. Tribology in Industry. 2001. Vol. 23, Iss. 3-4. P. 65-74
6. W. Grzesik, T. Wanat. Comparative assessment of surface roughness produced by hard machining with mixed ceramic tools including 2D and 3D analysis. Journal of Materials Processing Technology. 2005. 169(3). P. 364–371. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.04.080

-
7. Mertens A., Kumar P., Senthilvelan S. The effect of the mating gear surface over the durability of injection-molded polypropylene spur gears. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2016. 230(12). P.1401-1414. doi:10.1177/1350650116635423
 8. Musiał J, Horiashchenko S, Polasik R, Musiał J, Kałaczyński T, Matuszewski M, Śrutek M. Abrasion Wear Resistance of Polymer Constructional Materials for Rapid Prototyping and Tool-Making Industry. *Polymers*. 2020. 12(4). 873. <https://doi.org/10.3390/polym12040873>
 9. Zakalov O.V. Fundamentals of Friction and Wear in Machines. TNTU Publishing House I. Pulyuya: Ternopil, Ukraine, 2011. 322p.
 10. Tkachuk A., Zabolotnyi O., Chetverzhuk T., Svirzhevskiy K., Kononenko A. Increasing the Wear Resistance of the Friction Surfaces of Rotating Parts Made of Bearing Steels Through Hardening Processing Methods. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. 1060. 012025 doi:10.1088/1757-899X/1060/1/012025
 11. <https://www.directindustry.com/industrial-manufacturer/laser-profilometer-104787.html>
 12. <https://www.zedex.com.ua/uk/zedex-ua/zedex-100-ua/>.
 13. DIN 4776:1990-05. Measurement of surface roughness. 1990. 7p.

Marchuk Roman Mykolayovych – graduate student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: 4629663@stud.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2019-0609>.

Mnatsakanov Rudolf Georgievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Aircraft Continuing Airworthiness Department, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: mnatsakanov@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5035-2432>