



Journal of Chemistry and Technologies

pISSN 2663-2934 (Print), ISSN 2663-2942 (Online).

journal homepage: <http://chemistry.dnu.dp.ua>
editorial e-mail: chem.dnu@gmail.com



UDC678.743.4:621.891

FLUOROPOLYMER MATERIALS FOR FRICTION KNOTS MODERN MACHINES AND MECHANISMS

Oleg S. Kabat, Mykhailo P. Sula*, Oleksiy M. Voronyi

Ukrainian State University of Science and Technology, Educational and Scientific Institute "Ukrainian State Chemical and Technological University", str. Lazaryana, 2, Dnipro, 49000, Ukraine

Received 3 October 2024; accepted 10 January 2025; available online 15 April 2025

Abstract

In modern machine-building in Ukraine, quite significant difficulties arise, which are connected with the war between Ukraine and Russia. In particular, this concerns the shortage of some polymer materials of Russian production, which were previously widely used in Ukraine. Such polymers include fluoropolymer polytetrafluoroethylene, trademark "фторопласт-4". This material is quite widely used in friction units of machines and mechanisms. Therefore, the urgent task is to find an alternative to "фторопласт-4" produced by the countries of the European Union, the USA, China, etc. In the work, the following polytetrafluoroethylenes were chosen as an alternative to fluoroplastic-4: PTFE Powder101 and PTFE Powder161 manufactured by Stargetfluoro (Beijing, China). Studies of their physico-mechanical, thermophysical and tribological properties have been conducted and it has been established that at the studied materials exceed the norm at the same levels as "фторопласт-4" in terms of soft level. This allows us to assert that PTFE Powder101 and PTFE Powder161 fluoropolymers are an alternative to "фторопласт-4", which are fully capable of replacing it in the friction units of machines and mechanisms. Tribological studies were carried out to determine the run-in path of fluoropolymers PTFE Powder101 and PTFE Powder 161, which is 250–400 m during frictional interaction with steel. The maximum load limit (up to 0.8 MPa) at which products made of the studied materials retain their performance was determined.

Keywords: fluoropolymers; PTFE; friction; wear; frictional interaction

ФТОРПОЛІМЕРНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ СУЧАСНИХ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ

Олег С. Кабат, Михайло П. Сула, Олексій М. Вороний

Українського державного університету науки і технологій, Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет», вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49000, Україна

Анотація

У сучасному машинобудуванні в Україні виникають досить суттєві складності, які пов'язані із війною України та Росії. Зокрема це стосується дефіциту деяких полімерних матеріалів російського виробництва, які раніше знаходили широке використання в Україні. Так до таких полімерів відноситься фторполімер політетрафторетилен, торгової марки фторопласт-4. Цей матеріал досить широко використовується у вузлах тертя машин і механізмів. Тому актуальною задачею є пошук альтернативи фторопласту-4 виробництва країн Євросоюзу, США, Китаю тощо. У роботі в якості альтернативи фторопласту-4 були обрані такі політетрафторетилени: PTFE Powder101 та PTFE Powder161 виробництва Stargetfluoro (Пекін, Китай). Проведені дослідження їх фізико-механічних, теплофізичних та трибологічних властивостей встановлено, що за їх рівнем досліджені матеріали перевищують чи знаходяться на одному рівні із фторопластом-4. Це дозволяє стверджувати, що фторполімери марок PTFE Powder101 та PTFE Powder161 є альтернативою фторопласту-4, які повністю здатні його замінити в вузлах тертя машин і механізмів. Проведені трибологічні дослідження щодо встановлення шляху припрацювання фторполімерів PTFE Powder101 та PTFE Powder161, який під час фрикційної взаємодії із сталлю складає 250–400 м. Визначено граничну межу навантаження (до 0.8 МПа) за якого вироби із досліджених матеріалів зберігають свою працездатність.

Ключові слова: фторполімери; PTFE; тертя; зношування; фрикційна взаємодія.

*Corresponding author: e-mail: fggtdyfhbfhfhf@gmail.com

© 2025 Oles Honchar Dnipro National University;

doi: 10.15421/jchemtech.v33i1.312671

Вступ

Сучасні машини і механізми працюють у досить жорстких умовах експлуатації, що нега-тивно впливає на рівень їх надійності та довго-вічності [1–3]. До вузлів такого обладнання, які найчастіше виходять із ладу, слід віднести вузли тертя. Відповідно до статистичних даних, на них припадає до 60–70 % усіх відмов у роботі машин і механізмів [4].

Для покращення їх надійності та довговічності в парах тертя активно використовують полімери та полімерні композиційні матеріали на їх основі [5–10]. Найбільше розповсюдження у вузлах мають матеріали на основі фторполімерів [11–14].

Завдяки своєму унікальному рівню властивостей (низький рівень поверхневої енергії, здатність працювати без змащування, висока хімічна стійкість тощо) вони покращують умови роботи пари тертя, що, у свою чергу, збільшує надійність та довговічність вузла тертя сучасного обладнання вцілому.

До одного із найбільш розповсюджених фторполімерів, які використовуються у вузлах тертя машин і механізмів слід віднести політетрафторетилен.

В Україні найбільше розповсюдження отримав політетрафторетилен марки фторопласт-4, який виробляють у Росії. Однак, зважаючи на війну між Україною та Росією, цей матеріал не поставляється на територію нашої держави, що викликає проблему його нестачі. Тому актуальною задачею є пошук альтернативи фторопласту-4 виробництва країн Євросоюзу, США, Китаю тощо.

Об'єкти та методи досліджень

Об'єкти. В якості дослідних зразків полімерів були обрані політетрафторетилен марки: фторопласт-4, виробництва ТОВ «Гало Полімер Кірово-Чепецьк» (Кірово-Чепецьк, Росія); PTFE Powder101 та PTFE Powder161 виробництва Starget Fluoro (Пекін, Китай).

Експериментальна частина

Методи досліджень. Дослідні зразки із політетрафторетиленів були сформовані у прес-формах за допомогою гідравлічного пресу та перероблені у вироби методом вільного спікання у термошафі з температури 380–385 °C із витримкою 20 хв на 1 мм діаметра зразка.

Густину полімерів та ПКМ на їх основі визначено за ISO 1183 за допомогою методу гідростатичного зважування на аналітичних вагах ВЛР-200, з модулем для гідростатичного зважування.

Напруження при межі текучості (σ_y) та модуль пружності (E) в ході стискання вихідних полімерів та ПКМ на їх основі визначено за ISO 604 та ГОСТ 9550-81 на універсальній розривній машині 2167 Р-50 згідно з ISO 604.

Твердість (НВ) матеріалів визначено методом вдавлювання кульки на твердомірі 2013 ТШСП відповідно до ISO 2039-1.

Стійкість до дії температури об'єктів дослідження виміряно за допомогою методу термогравіметричного аналізу, відповідно до ISO-11358, методами сканування за температурою і часом на дериватографі TGA Q50.

Температуру розм'якшення за Віка T_{vc} визначено на приладі FWV-633/10 відповідно до ISO 1183-1.

Вимірювання лінійного теплового розширення α матеріалів виконано згідно з ГОСТ 15173-70 на приладі ДКВ-4.

Коефіцієнт тертя та інтенсивність лінійного зношування під час фрикційної взаємодії розроблених полімерів і ПКМ на їх основі зі сталлю визначено на машині СМТ-1 за режиму тертя без змащування за схемою диск-колодочка. Використано зразок зі сталі 45 з шорсткістю $R_a = 0.32$ мкм і твердістю 45–50 HRC. Температуру на поверхні тертя визначено за допомогою хромель-алюмелевої термопари, з'єднаної з вимірювальним приладом MASTECHMS6514.

Результати та їх обговорення

Аналог фторопласту-4 повинен мати не тільки подібну хімічну формулу та структуру, але й рівень властивостей та собівартість. Всім цим вимогам, відповідно до наявної інформації [15], задовольняє політетрафторетилен виробництва Starget Fluoro (Пекін, Китай).

З усього різноманіття продуктів, що випускає даний виробник, нами було обрано наступні марки політетрафторетилену: PTFE Powder101, PTFE Powder161. Ці матеріали найбільш близькі за хімічною формулою, структурою та собівартістю до фторопласту-4 і відрізняються основним розміром вихідних частинок (30–60 мкм для фторопласту-4; 150–

300 мкм для PTFE Powder101 і 20–30 мкм для PTFE Powder161) [16; 17; 18].

Для порівняльного аналізу вибраних фторполімерів із фторопластом-4 нами були

проведені фізико-механічні, теплофізичні та трибологічні дослідження. Їх результати приведені в табл. 1.

Table1

Physico-mechanical, thermophysical and tribological properties of the investigated fluoropolymers

Таблиця1

Фізико-механічні, теплофізичні та трибологічних властивості досліджених фторполімерів				
№ з/п	Показник властивостей	Значення		
		фторопласт-4	PTFE Powder101	PTFE Powder161
Фізико-механічні властивості				
1	Густина ρ , кг/м ³	2160	2140	2210
2	Напруження при межі текучості при стисканні σ_y , МПа	12	13	16
3	Модуль пружності E, МПа	610	600	650
4	Твердість НВ, МПа	42	43	43
Теплофізичні властивості				
5	Температура початку активної термічної деструкції, °C	446	444	450
6	Температура розм'якшення за Віка T _{VC} , °C	164	162	164
7	Коефіцієнт термічного лінійного розширення α , 1/°C	940	950	920
Трибологічні властивості (тертя без змащування при навантаженні P = 1 МПа, V = 1 м/с)				
8	Коефіцієнт тертя f	0,3	0,31	0,28
9	Температура на поверхні тертя T, °C	60	76	54
10	Інтенсивність лінійного зношування I _h , ×10 ⁻⁹ м/м	800	720	640

Відповідно до результатів проведених досліджень можна стверджувати, що вибрані фторполімери мають подібний рівень властивостей із фторопластом-4. Зокрема, вони відрізняються високим рівнем трибологічних властивостей під час тертя без змащування та достатнім рівнем фізико-механічних та теплофізичних властивостей для роботи в малонавантажених вузлах тертя сучасного обладнання. Їх подальше наповнення чи модифікація, по аналогії із фторопластом-4, дозволить отримувати полімерні композиційні матеріали, які здатні працювати під навантаженням до 2 МПа, швидкостях ковзання до 2.5 м/с та температурах до 160–180 °C [19–23], зберігаючи високий рівень працездатності вузлів тертя.

Зважаючи на те, що політетрафторетилен найчастіше використовується в вузлах тертя, доцільно дослідити більш докладно його трибологічні властивості під впливом різних навколишніх факторів.

Для матеріалів, які працюють у вузлах тертя, досить важливим фактором є визначення шляху ковзання, за яким відбувається припрацювання поверхонь, що труться [24]. Його можна встановити за значеннями температури на поверхні тертя. Результати досліджень залежності шляху

ковзання від температури на поверхні тертя приведені на рис. 1.

З аналізу проведених досліджень встановлено, що впродовж всього шляху ковзання досліджених матеріалів спостерігається збільшення температури на поверхні тертя. Причому в початковий період роботи спостерігається висока інтенсивність збільшення із подальшою стабілізацією температури. Ця стабілізація і є моментом, коли пара тертя пройшла період припрацювання і починає працювати у нормальному режимі роботи. Для досліджених полімерів період припрацювання лежить в інтервалі від 250 до 400 хв. Тобто для надійної та довговічної роботи даних вузлів тертя необхідно проводити їх притирання впродовж 250–400 хв за невисоких навантажень та швидкостях ковзання із наступним поступовим збільшенням цих параметрів до робочих.

Також слід звернути увагу на те, що температура на поверхні тертя під час фрикційної взаємодії PTFE й Powder101 із сталлю на 5–15 % більша, ніж для пари тертя з PTFE та Powder161.

Це пояснюється кращою хімічно чистотою та якіснішим структуроутворенням під час переробки політетрафторетилену із меншими вихідними розмірами частинок.

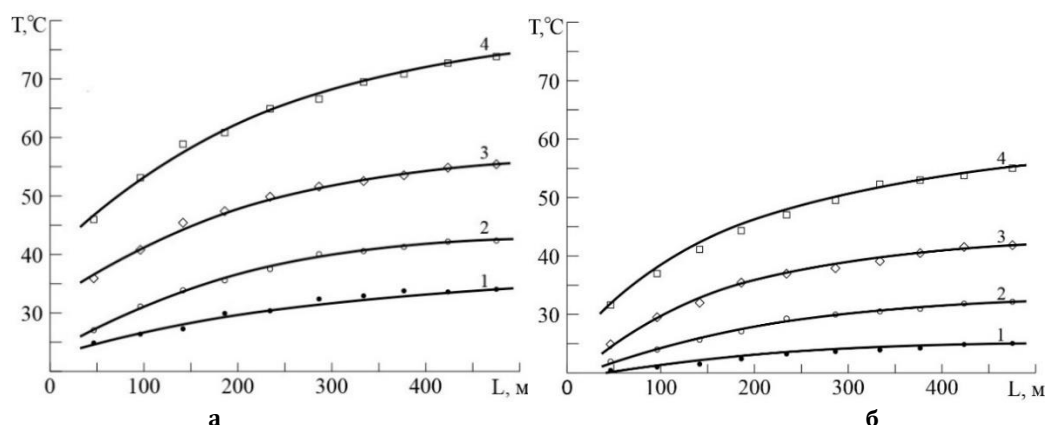


Fig. 1. Dependencies of the temperature on the friction surface (T) on the sliding path (L) during the frictional interaction of PTFE Powder101 (a) and PTFE Powder 161 (b) with steel by the loadings (MPa): 1 – 1.1; 2 – 0.8; 3 – 0.6; 4 – 0.35

Рис. 1. Залежності температури на поверхні тертя (T) від шляху ковзання (L) при фрикційній взаємодії PTFE Powder101 (a) та PTFE Powder 161 (б) із сталлю при навантаженнях (МПа): 1 – 1.1; 2 – 0.8; 3 – 0.6; 4 – 0.35

Також одним із основних зовнішніх факторів, які впливають на тертя фрикційної пари, є навантаження [25]. Тому досить важливо дослідити його вплив та основні трибологічні властивості досліджених пар

тертя із встановленням межових значень навантажень, за яких вузли тертя зберігають високий рівень надійності та довговічності в роботі в сучасних машинах і механізмах. Результати досліджень зображені на рис. 2.

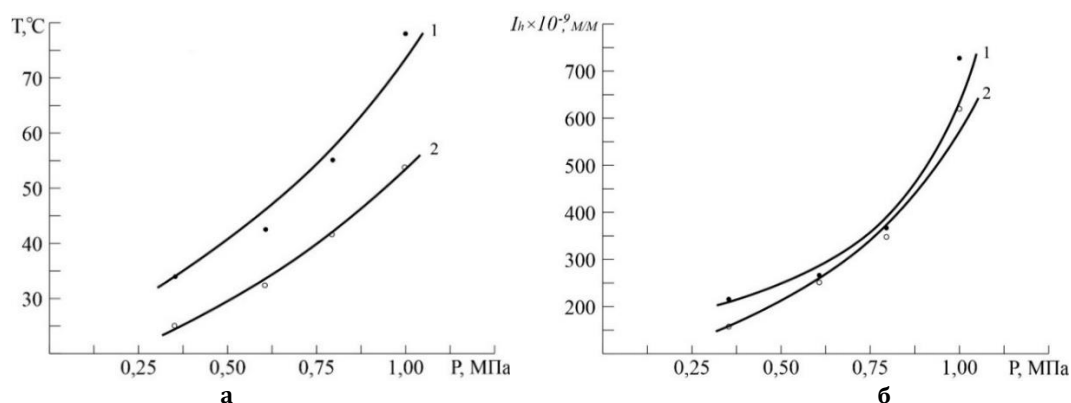


Fig. 2. Dependencies of (a) the temperature on the friction surface (T) and (b) the intensity of linear wear (I_h) on the load (P) during the frictional interaction of PTFE Powder101 (1) and PTFE Powder 161 (2) with steel

Рис.2. Залежності (a) температури на поверхні тертя (T) та (б) інтенсивності лінійного зношування (I_h) від навантаження (P) при фрикційній взаємодії PTFE Powder101 (1) та PTFE Powder 161 (2) із сталлю

Відповідно до проведених досліджень можна зробити висновки, що із збільшенням навантаження в вузлі тертя збільшуються значення температури на поверхні тертя та інтенсивність лінійного зношування досліджених фторполімерів. До того ж, інтенсивність зростання досліджених параметрів під навантаженнями від 0.3 до 0.8 МПа має лінійний характер (що відповідає нормальному режиму роботи пари тертя), а за більших навантажень значно збільшується. Така інтенсивна зміна характеру залежності (рис. 2) свідчить про настання аварійного режиму роботи пари тертя, під час якого відбувається швидке руйнування фрикційних поверхонь, що призводить до заклинювання та виходу із ладу вузла тертя. Відповідно до

цього можна стверджувати, що межовим навантаженням, яке витримують деталі із фторполімерів PTFE Powder101 та Powder 161, зберігаючи високий рівень надійності та довговічності у вузлах тертя, є 0.8 МПа.

Висновки

Відповідно до фізико-механічних, теплофізичних та трибологічних досліджень визначено, що фторполімери PTFE Powder101 та PTFE Powder161 можна використовувати в якості аналогів фторопласту-4.

Встановлено, що шлях припрацювання фторполімерів PTFE Powder101 та PTFE Powder 161 під час фрикційної взаємодії із сталлю складає 250–400 хв. Це дозволяє надавати рекомендації до припрацювання

впродовж визначеного шляху нових вузлів тертя із дослідженими фторполімерами. Визначено, що деталі із PTFE Powder101 та PTFE Powder161 зберігають свою

працездатність та високий рівень надійності і довговічності під час фрикційної взаємодії із сталлю в інтервалі навантажень від 0.25 до 0.8 МПа.

References

- [1] Van, B. A. (2012). Advanced Engineering Design. Design for reliability. Delft: Delft University of Technology Mechanical Engineering.
- [2] Sharvan, K., Nitin, P.P. (2018). Materials in the Aircraft Industry. *Metallurgical Design and Industry*, 271–346. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93755-7_5
- [3] Aulin, V., Lyashuk, O., Gupka, A., Tson, O., Mironov, D., Sokol, M., Leshchuk, R., Yarema, I. (2024). Tribodiagnosis of the surface damage of tribo-coupling part materials during machine operation. *Procedia Structural Integrity*, 59, 428–435. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.061>
- [4] Zakalov, O.V., Zakalov, I.O. (2011). [Basics of friction and wear in machines]. Ternopil, Ukraine: I.Puliuy National Technical University of Ternopil, 322p. (in Ukrainian).
- [5] Kabat, O. S., Kobets, A.S., Derkach O. D., Makarenko, D.O., Hnatko, O. M. (2024). Practice of using parts made of the heat-resistant polymer composites in the chemical industry and agricultural engineering. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 19(1), 40–47. https://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2024/jeas_0124_9384.pdf
- [6] Kabat, O., S., Girin, O., Heti, K. (2023). Polymer composites based on aromatic polyamide and fillers of spherical and layered structure for friction units of high-performance equipment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 237(11), 2669–2676. <https://doi.org/10.1177/14644207231176796>
- [7] Sytar, V., Kuzyayev, I., Kabat, O., Kudrayvtsev, A. (2023). Heat-resistant gas-filled composites based on phenylon and inorganic pore formers. *Journal of Chemistry and Technologies*, 31(1), 120–127. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i1.268810>
- [8] Kabat, O., Makarenko, D., Derkach, O., Muranov, Y. (2021). Determining the influence of the filler on the properties of structural thermal-resistant polymeric materials based on phenylone C1. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/6(113), 24–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.243100>
- [9] Yinga, L., Xueshia, C., Zhang, J. (2024). A study on improving friction and wear performance of bearing bush in radial piston hydraulic motor. *Wear*, 546–547. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205317>
- [10] Kobets, A., Aulin, V., Derkach, O., Makarenko, D., Hryniv, A., Krutous, D., Muranov, E. (2020). Design of mated parts using polymeric materials with enhanced tribotechnical characteristics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5–12(107), 49–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.214547>
- [11] He, Y., Walsh, D., Shi, C. (2015). Fluoropolymer composite coating for condensing heat exchangers: characterization of the mechanical, tribological and thermal properties. *Appl Therm Eng*, 91, 387–398. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.08.03>
- [12] Danavath, B., Piyush, C. V., Suresh, K. R.N., Sujith, R., Prabakaran, S. (2024). Tribological Investigation of Chemically Modified Polytetrafluoroethylene Coating for Hydrogen Valve Application. *Tribology Letters*, 72(3), 72–82. <https://doi.org/10.1007/s11249-024-01869-x>
- [13] Kangan, Q., Qing, P. (2024). Tribological characteristics and wear mechanisms of reinforced composites against steel. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 37(7). <https://doi.org/10.1177/0892705723120>
- [14] Shengkang, D., Zhiwei, G., Hongshuang, Z., Chengqing, Y. (2023). Effect of Silicon Carbide Particles on Tribological Properties of Polytetrafluoroethylene Water-Lubricated Bearing Composites. *J. of Materi Eng and Performe*, 33, 5667–5681. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08337-y>
- [15] PTFE Powder. <https://stargetfluoro.com/product/ptfe-powder/>
- [16] PTFE Molding Powder 101. <https://stargetfluoro.com/wp-content/uploads/2023/06/PTFE-Molding-Powder-101.pdf>
- [17] PTFE Molding Powder 161. <https://stargetfluoro.com/wp-content/uploads/2023/06/PTFE-Molding-Powder-161.pdf>
- [18] Kabat, O.S., Kharchenko, B.G., Derkach, A.D., Artemchuk, V.V., Babenko, V.G. (2019). [Polymer composite materials based on fluoroplastic and the method of their production]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 3, 166–122. (In Russian). <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2019-124-3-116-122>
- [19] Kabat, O. S., Dusheiko, M. V. (2017). [Polymer composite materials for special purposes based on fluoroplastic]. *Technological Systems*, 4(81), 63–67. (in Ukrainian). <http://dx.doi.org/10.29010/081.8>
- [20] Kabat, O.S., Derkach, O.D., Pavlushkina, N.V., Pikula, I.I. (2019). Polymeric composites of tribotechnical purpose based on fluoropolymers. *Problems of Tribology*, 92(2), 75–81. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-92-2-75-81>
- [21] Kabat, O.S., Heti, K. V., Kovalenko, I. L., Dudka, A. M. (2019). Fillers on the silica base for polymer composites of constructional purpose. *Journal of chemistry and technologies*, 27(2), 247–254. <https://doi.org/10.15421/08192702>
- [22] Weixuan, L., Wang, T., Wang, Q., Yap, K.K., Song, F., Wang, C. (2024). Tribological and Mechanochemical Properties of Nanoparticle-Filled Polytetrafluoroethylene Composites under Different Loads. *Polymers*, 16. <https://doi.org/10.3390/polym16070894>
- [23] Sun, W., Jiaxin, Y., Yunlong, J., Xiaojun, L. (2024). Nanofiller tribochemical functionality is not sufficient to achieve ultralow wear of PTFE. *Wear*, 548–549. doi:10.1016/j.wear.2024.205379
- [24] Zambrano, O. A., Iglesias-Guerrero, B., Rodríguez, S. A., Coronado, J. J. (2024). Running-in Period During Sliding Wear of Austenitic Steels. *Tribology Letters*, 72. <https://doi.org/10.1007/s11249-024-01867-z>
- [25] Jiang, S., Qiang, L., Liu, Q., Kouediatouka, A. N., Ji, H., Dong, G. (2024). A friction mechanism for surface texturing under dry/mixed lubrication conditions based on the sublinear dependence of friction on load. *Tribology International*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109488>