

8.3 Трибологічна поведінка полімерних матеріалів для металополімерних зубчастих передач

У металополімерних (МП) зубчастих передачах, що працюють в умовах сухого тертя ковзання, використовують різні полімерні матеріали та композити на їх основі. До поширених відносяться поліаміди, зокрема PA6, PA66 та композити на їх основі - наповнені короткими скляними (PA6+30GF) чи вуглецевими (PA6+30CF) волокнами, дисульфідом молібдену (PA6+MoS₂), литий з мастилом (PA6+Oil). Також це гомополімер поліацеталю POM - Н і його композити: односкладникові - POM+35PTFE, POM+20PTFE, POM+60Bronze; двоскладникові - POM+20PTFE+30Bronze; POM+10PTFE+20Bronze, POM+15PTFE+15GF, POM+10PTFE+10GF та трьох складникові - POM+10PTFE+20Bronze+10GF, POM+10PTFE+15Bronze+5GF. Також при знаходять застосування у МП зубчастих передачах і високоефективні полімери - поліефірефіркетон РЕЕК та композит РЕЕК+30GF, терефталан етилену PET та композит PET+30PTFE.

Для оцінки зносостійкості полімерних матеріалів широко використовують схему торцевого тертя за умовами стандарту ISO 7148-2 [400]. Тут забезпечуються постійні умови навантаження та швидкість ковзання, а теж і постійні умови тертя і зношування протягом усього експерименту. Тому результати таких досліджень об'єктивно відображають абсолютні та відносні показники (індикатори) зносостійкості матеріалів досліджуваних трибопар при вказаних умовах, що дозволяє проводити їх порівняльну оцінку. Слід відзначити, що згідно стандарту ISO 7148-2 тестування зношування матеріалів у трибоекспериментальних дослідженнях проводять при визначеній конкретній величині контактного тиску у трибопарі. Проте у розрахункових методах зношування зубчастих передач відносні показники зносостійкості матеріалів – інтенсивність та швидкість зношування, визначені при одному рекомендованому стандартному навантаженні, не можуть бути використані при іншій величині навантаження. Це різко обмежує їх практичне застосування. Для уникнення

вказаного обмеження слід проводити трибоекспериментальні дослідження трибопар в певному діапазоні зміни навантажень і за їх результатами встановити характеристики зносостійкості, необхідні для використання у трибокінетичних моделях кінетики зношування трибосистем.

У літературі [401 - 413] досліджувалась експериментально трибологічна поведінка різних полімерних матеріалів при сухому терті за схемою торцевого тертя чи інших схемах. У [401] було досліджено зношування трибопари PA6 - сталь AISI 02. Найбільш широкомасштабні з них проведено у роботі [402], де наведено результати дослідження двадцять одного інженерного комерційного полімеру, як ненаповнених, так і композиційних. Трибологічну поведінку PA6 по сталі за різних умов випробувань, в т.ч. і при сухому терті, вивчено у [403 - 405]. У [406] досліджено тертя і зношування 18 полімерів у трибопарі зі підшипниковою сталлю AISI 52100 на повітрі та у воді, зокрема PA66, POM, PEEK. Робота [407] присвячена дослідженню впливу шорсткості поверхні сталі 40CrMnNiMo8 на тертя і зношування полімерів PTFE, POM-H, PA6+GF, PA6+CF. Трибологічна поведінка харчових полімерів, зокрема PA6, POM, при сухому терті по нержавіючій сталі була досліджена у [408]. У літературі наявні окремі результати експериментальних досліджень трибологічної поведінки металополімерної пари сталь - поліефірефіркетон PEEK та його композити, а обмаль для сталь - терефталан етилену PET. Зокрема такі результати подано у працях [409 – 413]. У [409] порівняно зношування при сухому терті PEEK по сталі. У роботі [410] досліджено ненаповнений PEEK, PEEK+10CF+10Graphite, PEEK+10CF+10Graphite+10PTFE по сталі AISI 52100(100Cr6). За схемою торцевого тертя PEEK / нержавіюча сталь 316L досліджено зношування трибопари у [411]. Відповідно у [412] досліджували за схемою кулька шість полімерних композитів: PA6+Oil, PA6+MoS₂, POM+Aluminium, PET+PTFE, PTFE+Bronze, PTFE+Graphite. Праця [413] присвячена дослідженню зношування модельних зубчастих передач з полімерними колесами: як з однойменних матеріалів PEEK / PEEK, так і PEEK / сталь, сталь / PEEK.

Відповідно за методикою модельних трибоекспериментів [414] проведено дослідження по встановленню індикаторів та характеристик зносостійкості вищенаведених полімерних матеріалів у парі зі сталлю 45. З використанням таких характеристик проводився розрахунок зубчастих передач як з металевих матеріалів [414, 415], так і МП передач [416, 417].

Для дослідження зносостійкості вказаних полімерних композитів використано схему торцевого тертя з двома композитами стержнями 4 і сталевий диск 5, при якій забезпечуються незмінні умови тертя і зношування протягом експерименту. Практична реалізація трибоекспериментів була виконана на трибометрі, схема якого подана на рис. 1.

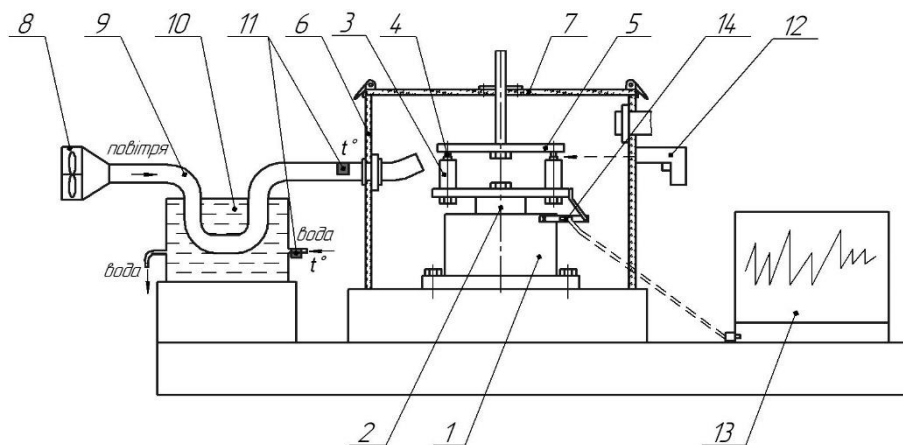


Рис. 1. Схема експериментальної установки pin-on-disk: 1 – корпус; 2 – рухома вісь зі зразкотримачами; 3 – зразкотримач; 4 – полімерні пальцеві зразки; 5 – сталевий дисковий контрзразок; 6 – бокс; 7 – знімна кришка; 8 – нагнітач повітря; 9 – повітревідвід; 10 – водяний теплообмінник; 11 – термодатчики; 12 – пірометр; 13 – комп’ютер, 14 – тензобалка для замірювання моменту тертя

Для проведення досліджень при сухому терті вказаних полімерних матеріалів вибрано наступну програму: контактний тиск $p_i = 2, 4, 6, 8$ МПа, швидкість ковзання $v = 0,4$ м/с, тривалість експерименту $t = 5 \dots 10$ год, діаметр пальцевого зразка $d = 3$ мм.

Натомість стандарт ISO 7148-2 передбачає для цього виду полімерних матеріалів такі умови: тиск $p = 3$ МПа, швидкість $v = 0,4$ м/с, температура

полімерного зразка поблизу стику з металевим контрдиском $T = 23 \pm 1^\circ\text{C}$ при відносній вологості повітря $50 \pm 5\%$ у ізолюваному боксі установки.

Експериментальні індикатори зносостійкості Φ_i полімерних матеріалів встановлено таким чином:

$$\Phi_i = L_i / h_i, \quad (1)$$

де $L = vt$ - шлях тертя, h_i - лінійне зношування дослідних полімерних зразків, $i = 1, 2, 3, \dots$ ступені номінального контактного тиску p_i .

У модельних трибоекспериментальних дослідженнях параметром навантаженості трибоконтакту прийнято похідну контактного тиску, якою є кулонівська питома сила тертя $\tau = fp$, де f - коефіцієнт тертя ковзання, встановлений експериментально.

Отримані дані про індикатори зносостійкості Φ_i та значення питомої сили тертя $\tau_i = f_i p_i$ використано для побудови графіків у координатах $\Phi - \tau$. В наступному з метою використання цих досліджень у розрахунковому методі [414, 415] МП зубчастих передач було визначено характеристики зносостійкості матеріалів трибокінетичної моделі дослідження зношування матеріалів при терті ковзання [414 - 417]. Відповідно певного виду функцією апроксимовано низку дискретних дослідних індикаторів зносостійкості Φ_i та визначено вказані нижче характеристики зносостійкості матеріалів досліджених МП трибопар.

Апроксимаційна функція для МП зубчастих передач має вид [414 - 416]

$$\Phi_k(\tau) = C_k \left(\frac{\tau_{sk}}{\tau} \right)^{m_k}, \quad (2)$$

де $\Phi_k(\tau)$ - характеристична функція зносостійкості - базовий інтегральний параметр математичної моделі зношування, C_k, m_k - характеристики зносостійкості матеріалів досліджуваної трибопари, $\tau_s = 0.5 \sigma_b$ - границя міцності матеріалів при зрізі, $k = 1; 2$ - нумерація елементів трибопари.

Результати проведених досліджень за поданою вище методикою щодо встановлення характеристик C_2, m_2 зносостійкості полімерних матеріалів для МП зубчастих передач при заданих умовах подано у таблицях 1, 2, 3.

Дані про матеріали: шестерня 1 – сталь 45 нормалізована, $E_1 = 210000$ МПа – модуль Юнга, $\nu_1 = 0,3$ - коефіцієнт Пуассона, $C_1 \cdot 10^9$, $m_1 = 2$; зубчасте колесо 2 – полімерні матеріали (табл. 1 – 3).

Таблиця 1. Характеристики зносостійкості поліамідів

Характеристики зносостійкості	Поліаміди					
	PA6	PA66	PA6+30GF	PA6+MoS ₂	PA6+30CF	PA6+Oil
$C_2 \cdot 10^6$	1,34	1,98	1,88	3,08	3,67	4,20
m_2	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
τ_{S2} , МПа	40	40	50	38	40	38

Примітка: Цифри вказують процентний об'ємний вміст наповнювача у композиті

Таблиця 2. Характеристики зносостійкості поліацеталів

Характеристики зносостійкості	Поліацеталі				
	POM-H	POM+35PTFE	POM+20PTFE	POM + 60Bronze	POM +20PTFE +30Bronze
$C_2 \cdot 10^6$	0,112	0,227	0,227	0,180	0,285
m_2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
τ_{S2} , МПа	33	30	30	35	35
	POM +10PTFE +20Bronze	POM +15PTFE +15GF	POM +10PTFE +10GF	POM +10PTFE+ 20Bronze+10 GF	POM +10PTFE +15Bronze +5GF
$C_2 \cdot 10^6$	0,146	0,424	0,312	0,62	0,312
m_2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
τ_{S2} , МПа	35	33	33	33	33

Примітки: PTFE – політетрафторетилен (тефлон, фторопласт), Bronze – бронзовий порошок

Таблиця 3. Характеристики зносостійкості поліефірефіркетонів та терефталанів

Характеристики зносостійкості	Термопластичні полімерні матеріали			
	PEEK	PEEK+30GF	PET	PET+20PTFE
$C_2 \cdot 10^6$	1,70	1,59	3,99	7,15
m_2	1,15	1,15	1,15	1,15
τ_{S2} , МПа	50	80	40	38

Результати трибоекспериментальних досліджень подано на рис. 2 – 8. Зокрема на рис. 2 представлено діаграми зносостійкості вищевказаних поліамідів.

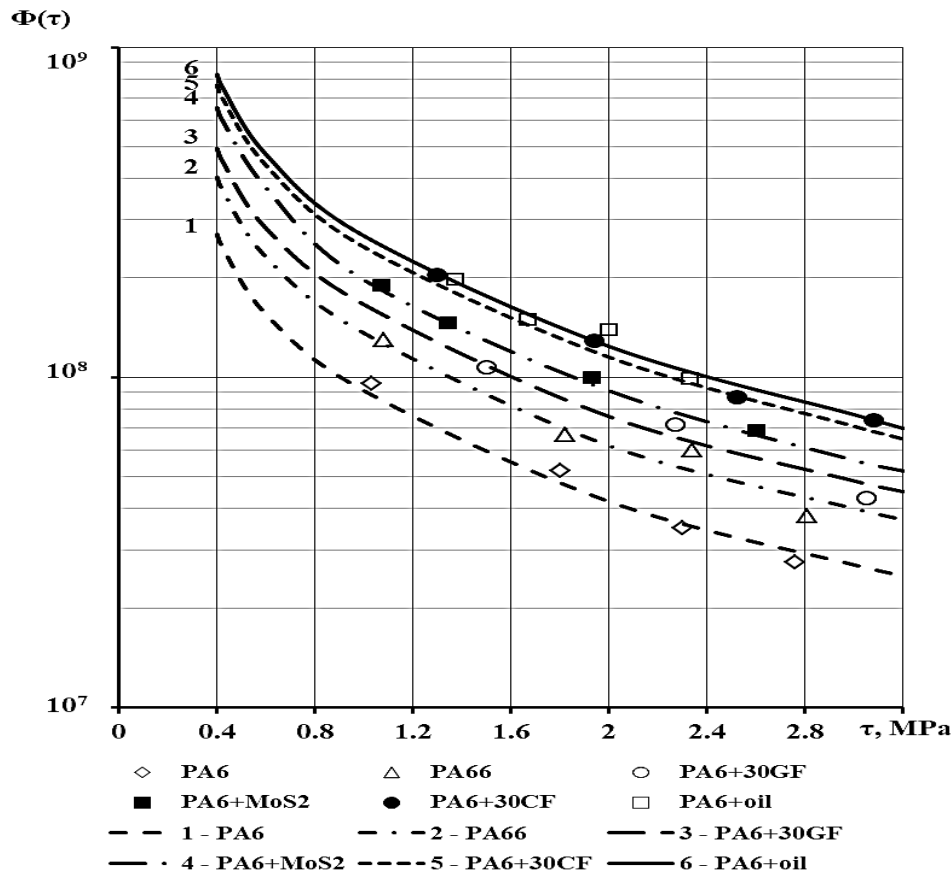


Рис. 2. Об'єднані діаграми зносостійкості поліамідів

Маркерами зображено дослідні індикатори зносостійкості $\Phi_i = L_i / h_i$ поліамідів при кожній ступені $\tau_i = \bar{f}p_i$. Вони при однакових тисках на контакті розташовані по осі τ по-різному. У результаті їх апроксимації функцією (2) визначено характеристики зносостійкості C_2, m_2 (табл. 1) поліамідів, за якими побудовано їх діаграми зносостійкості (вищеподані графіки). Залежність зносостійкості від питомої сили тертя є нелінійною. Якісний характер зміни зносостійкості різних поліамідів є практично однаковим.

На рис. 3 подано об'єднані діаграми зносостійкості PEEK, PEEK+30GF, PET, PET+30PTFE разом з поліамідами PA6 (min), PA6+30CF (max).

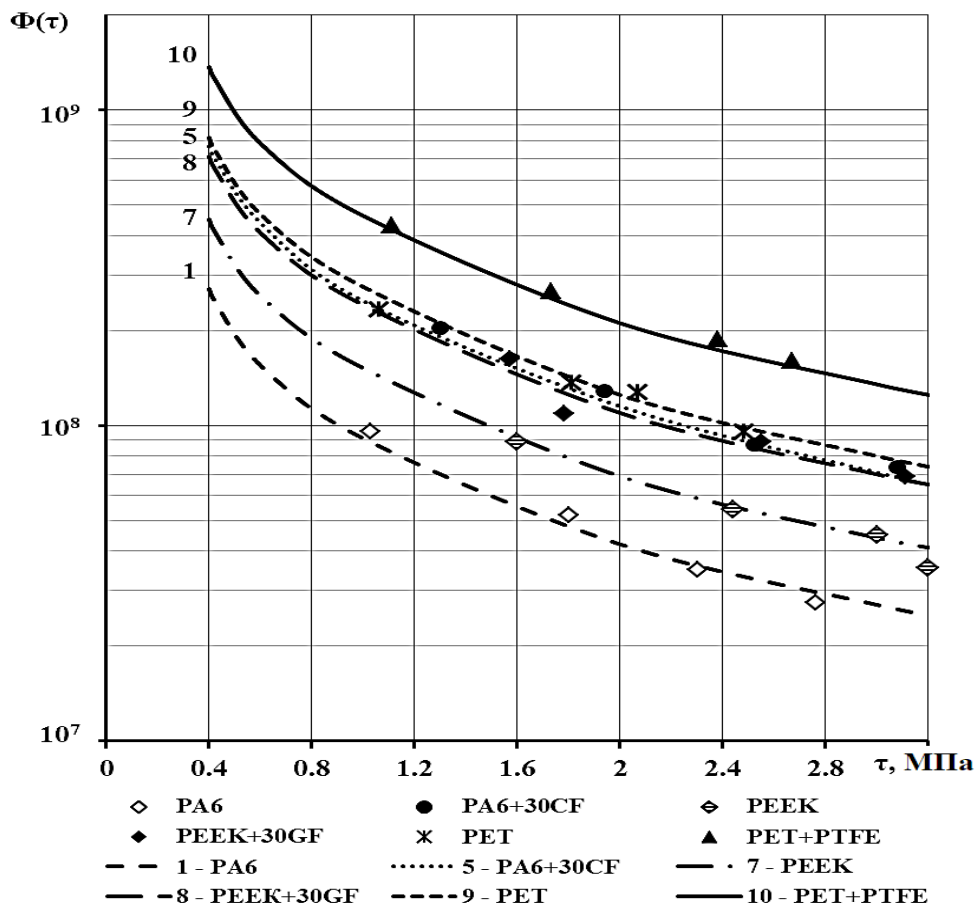


Рис. 3. Об'єднані діаграми зносостійкості поліамідів PA6 (min), PA6+30CF (max), PEEK, PEEK+30GF, PET, PET+20PTFE

Тут наведено діаграми зносостійкості поліамідів з мінімальною (PA6) та максимальною (PA6+30CF) зносостійкістю та діаграми поліефірефіркетонів PEEK, PEEK+30GF, композиту терефталанів етилену PET, PET+20PTFE. Якісні зміни зносостійкості цих груп полімерних матеріалів на усьому діапазоні зміни питомих сил тертя є однаковими. Поліамід PA6+30CF має близьку зносостійкість до PEEK+30GF та PET. Якісні закономірності зростання зносостійкості композиту поліефірефіркетону та композиту терефталану порівняно з цими ненаповненими полімерами практично однакові. Модифікація помітно підвищує їх зносостійкість. Поліефірефіркетони мають нижчу зносостійкість, ніж терефталани.

Кількісний вплив наповнювачів різного виду базових полімерів на їх зносостійкість відносно зносостійкості PA6 при величині питомої сили тертя $\tau = 2$ МПа продемонстровано на рис. 4. Оскільки для вказаних полімерів якісна

зміна їх зносостійкості (рис. 2, 3) є практично однаковою на поданому діапазоні τ , то тому тут величина відношення буде сталою.

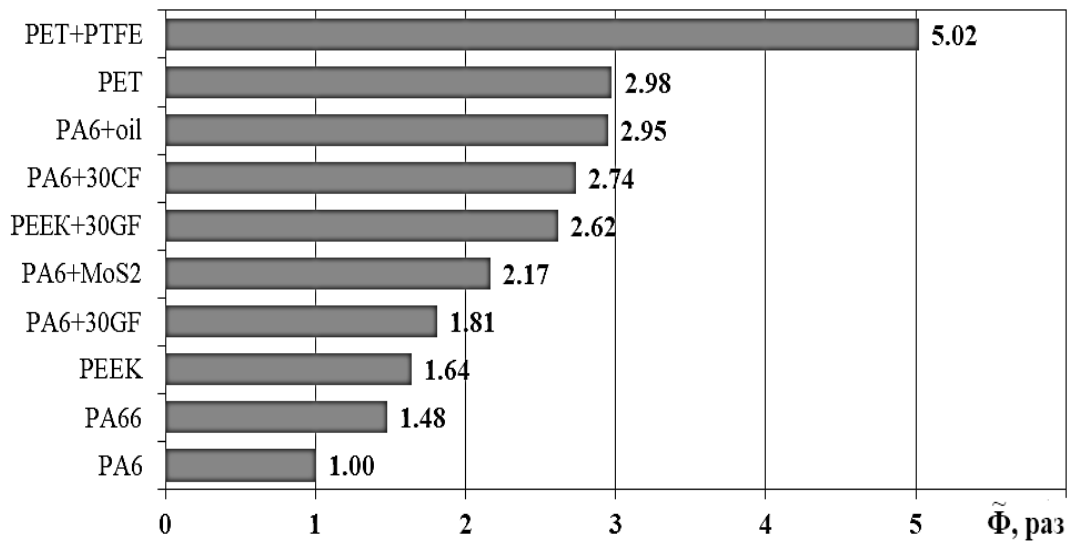


Рис. 4. Відносна зносостійкість при $\tau = 2$ МПа поліамідних композитів, поліефірефіркетонів та терефталанів порівняно із зносостійкістю поліаміду PA6

Аналіз поданих діаграм відносної зносостійкості (рис. 4) свідчить про значний вплив наповнювачів на підвищення зносостійкості базового полімеру. Зокрема $\tilde{\Phi}$ складає:

- для поліамідів PA6 : PA6+30GF : PA6+MoS₂ : PA6+30CF : PA6+oil = 1 : 1.81 : 2.17 : 2.74 : 2.94 рази,

- для PA6 : PEEK : PEEK+30GF = 1 : 1.64 : 2.62 рази,

- для PA6 : PET : PET+20PTFE = 1 : 2.88 : 5.02 рази,

- для PEEK : PEEK+30GF = 1 : 1.6 рази,

- для PET : PET+20PTFE = 1 : 1.68 рази.

- для PEEK : PET = 1 : 1.82 рази.

На рис. 5 за об'єднаними діаграмами зносостійкості легко прослідкувати як якісні, так і кількісні закономірності впливу модифікації на трибологічну стійкість поліацеталевих композитів.

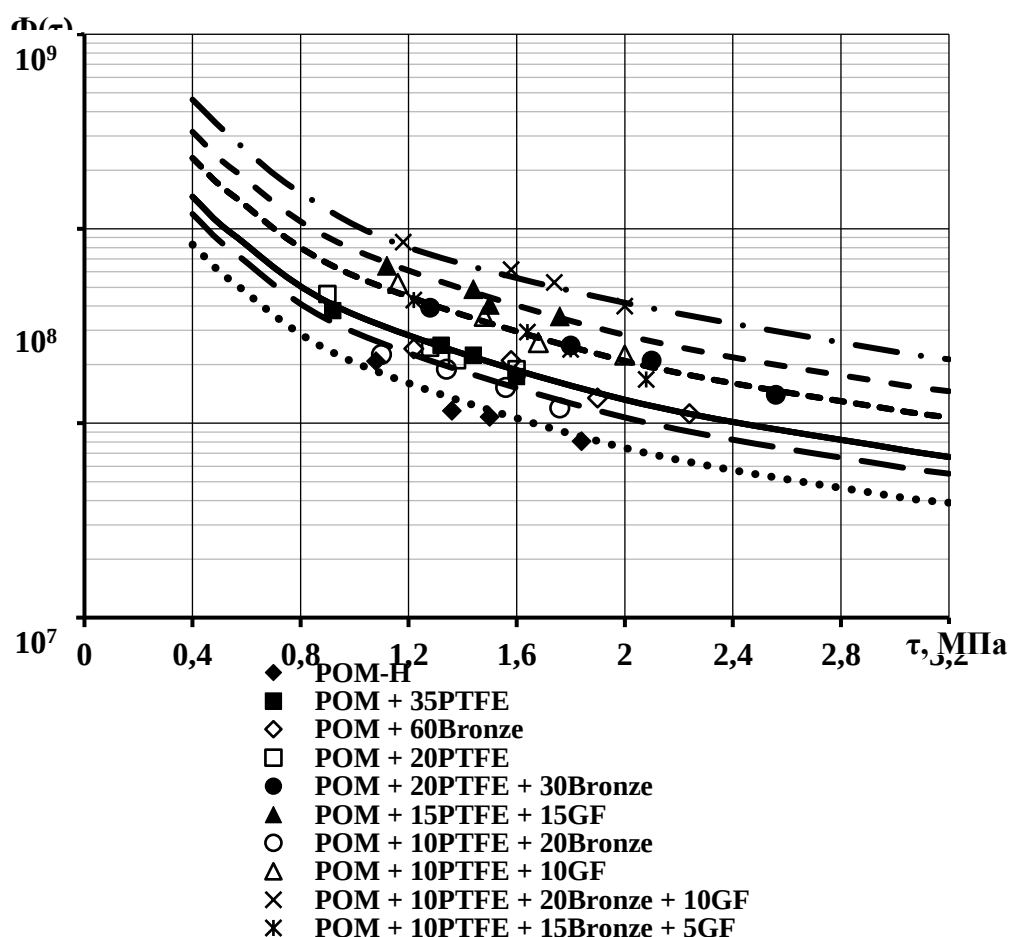


Рис. 5. Об'єднані діаграми зносостійкості поліацеталю і його композитів

Кількісний вплив наповнювачів різного виду на відносну зносостійкість композитів поліацеталю відносно зносостійкості POM-H при питомій сил тертя $\tau = 2$ МПа показано на рис. 6.

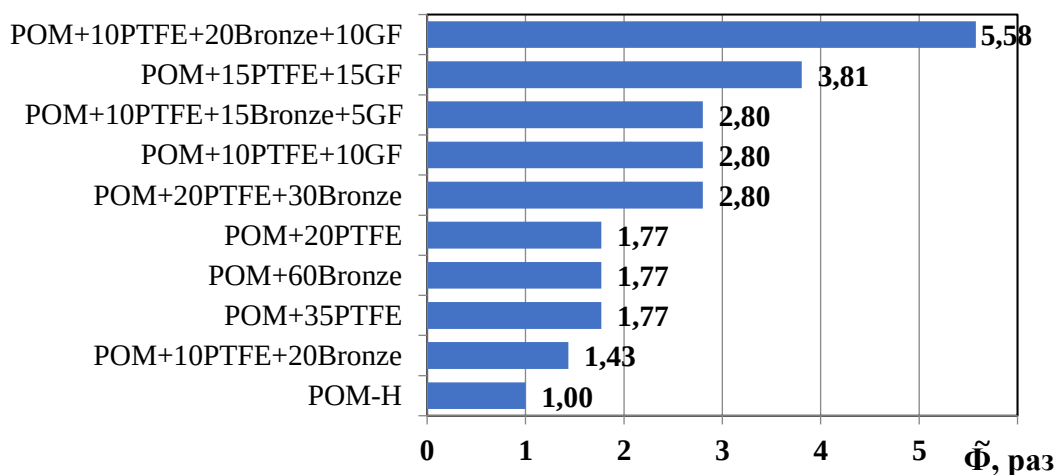


Рис. 6. Відносна зносостійкість при $\tau = 2$ МПа композитів поліацеталю порівняно зі зносостійкістю ненаповненого поліацеталю POM-H

Встановлено, що у односкладових композитів (POM+20PTFE, POM+35PTFE, POM+60Bronze) зносостійкість зростає на однакову величину у порівнянні з POM-Н, тобто у 1.77 рази. Щодо інших дво- і трискладових композитів, то вони мають ще вищу зносостійкість у 2.8, 3.81, 5.58 рази, окрім композиту POM+10PTFE+20Bronze (1.43 рази). Тут скловолокно, як наповнювач, підвищує зносостійкість композитів POM+10PTFE+10GF, POM+10PTFE+5Bronze+5GF, POM+15PTFE+15GF, POM+10PTFE+20Bronze+10GF. Найвищу зносостійкість має трискладовий композит POM+10PTFE+20Bronze+10GF.

У двоскладових композитах POM+10PTFE+20Bronze та POM+20PTFE+30Bronze різниця у зносостійкості у порівнянні з POM-Н є досить різною, тобто у 1.77 і 2.8 разів. Тобто збільшення вмісту порошку бронзи та політетрафторетилену у базовому полімері (POM-Н) спричиняє збільшення зносостійкості. Відносне підвищення зносостійкості між обома вказаними композитами складає $2.8 : 1.43$, тобто 1.96 рази.

Нижче на рис. 7 подано об'єднану діаграми усіх досліджених полімерних матеріалів зносостійкості матеріалів метало полімерних для МП зубчастих передач. А на рис. 8 показано відносну зносостійкість цих полімерних матеріалів.

Як було зазначено вище відносна зносостійкість базових полімерів PA6, PA66, PEEK, PET стосовно POM-Н буде: $5.63 : 8.31 : 9.25 : 16.76$ рази. Натомість відносна зносостійкість трьох інших базових полімерів PA66, PEEK, PET стосовно PA6 буде: $1 : 1.48 : 1.64 : 2.98$ рази (рис. 3). Відповідно для PEEK, PET стосовно PA66 буде: $1.11 : 2.02$ рази, PET стосовно PEEK більш зносостійкий у 1.81 рази. Натомість відносна зносостійкість композитів легко може бути встановлена як це подано на рис. 8 при питомій силі тертя $\tau = 2$ МПа при її інших величинах за діаграмами зносостійкості, поданими на рис. 7.

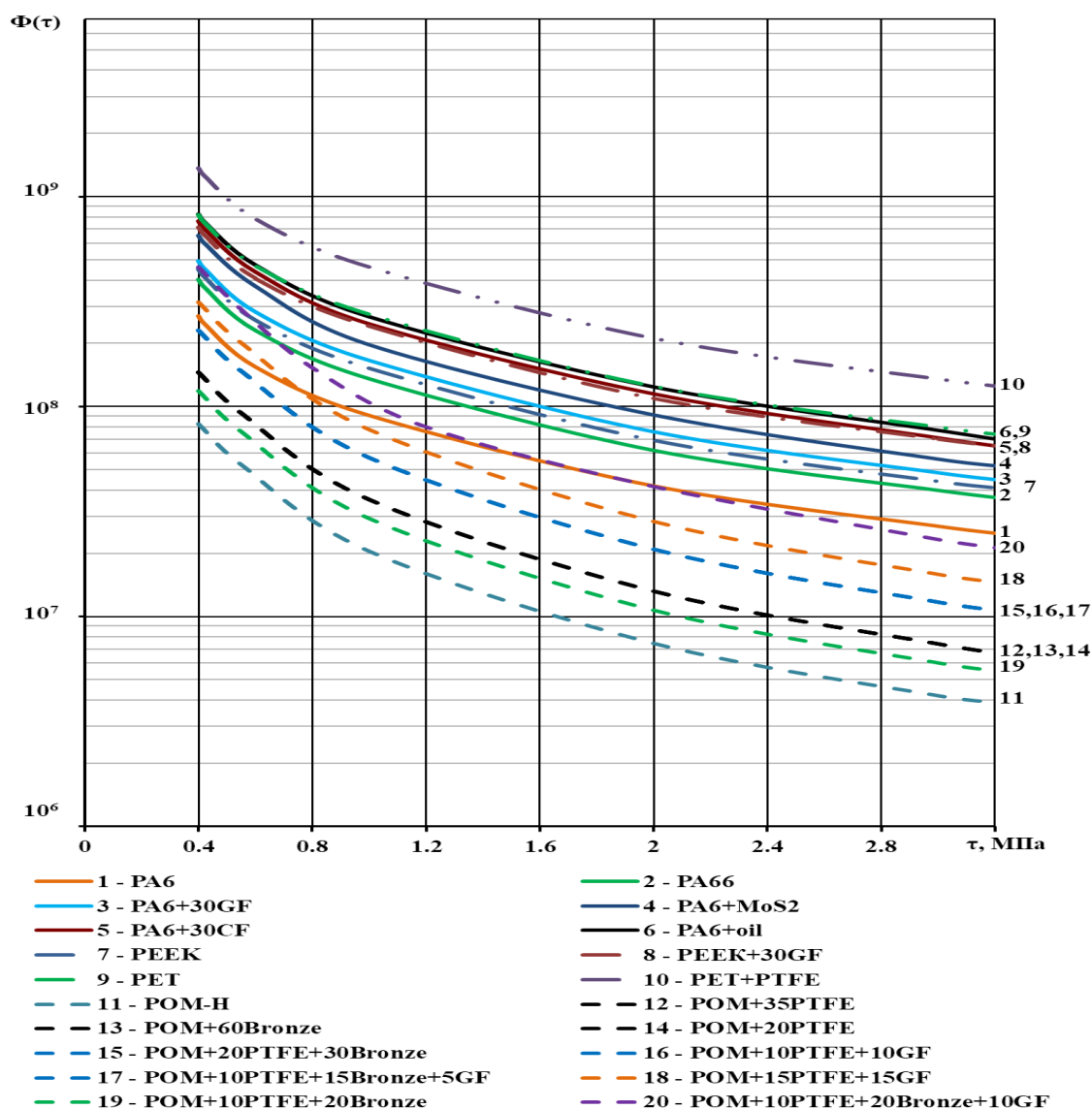
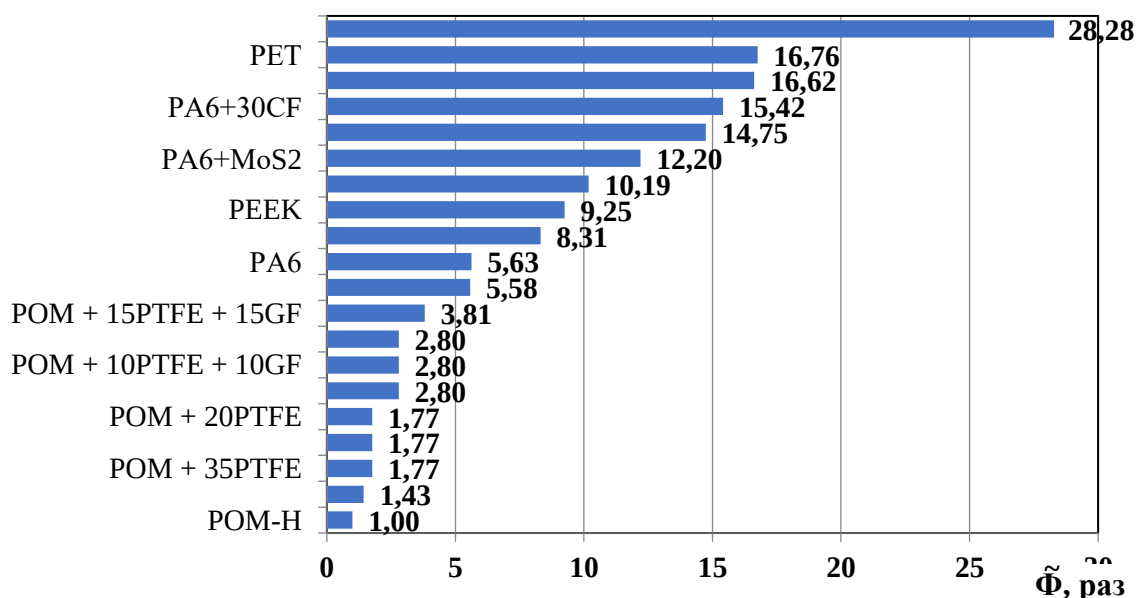


Рис. 7. Об'єднані діаграми зносостійкості полімерних матеріалів МПЗ передач

Рис. 8. Відносна зносостійкість при $\tau = 2$ МПа полімерних матеріалів МП передач

За результатами досліджень сформульовано наступні висновки:

1. Подані діаграми зносостійкості досліджених полімерних матеріалів є міні довідником для вибору матеріалів для металополімерних зубчастих передач.
2. За об'єднаними діаграмами можливо порівняти зносостійкість різних полімерних матеріалів при однакових питомих силах тертя.
3. Також при наявності сімейства такого виду діаграм зносостійкості для конкретного базового композиту з різним процентним змістом наповнювача можливо достатньо обгрунтовано екстраполювати зносостійкість композиту з проміжним вмістом наповнювача, враховуючи тенденцію якісних і кількісних змін еквідистантних ДЗМ.