

УДК 691.175(043.2)

DOI: 10.18372/0370-2197.4(109).20761

*Р. М. МАРЧУК, Р. Г. МНАЦКАНОВ**Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна*

ТРИБОЛОГІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ ТА СТРУКТУРНА АДАПТАЦІЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

У роботі представлено результати дослідження мікротвердості композиційних полімерних матеріалів після триботестування за різних умов ковзання. Дослідження є продовженням попереднього етапу, в якому було виявлено явище структурної адаптації полімеру в зоні контакту. У поточній роботі проаналізовано поведінку промислових та експериментально виготовлених композитів, зокрема матеріалів на основі РЕЕК, РТФЕ, графіту, полістиролу та епоксидної смоли. Випробування проводилися за аналогічних умов навантаження, що дозволило порівняти результати та оцінити вплив складу матеріалу на його здатність до зміцнення або знеміцнення в процесі тертя. Отримані дані сприяють визначенню перспективних полімерних композитів для використання у вузлах тертя, зокрема підшипниках ковзання, що працюють у складних експлуатаційних умовах.

Ключові слова: *полімерні композиційні матеріали (ПКМ), полістирол, графіт, політетрафторетилен, поліефіркетон, мікротвердість, швидкість ковзання, зносостійкість, трибологічні властивості.*

Вступ. Полімерні матеріали та композити на їх основі активно застосовуються в елементах тертя, зокрема у вузлах ковзання, завдяки їх низькому коефіцієнту тертя, хімічній стійкості та здатності до адаптації під дією механічного навантаження. Одним із ключових показників, що визначає працездатність таких матеріалів, є мікротвердість, яка може змінюватися в процесі експлуатації. Вивчення змін мікротвердості після триботестування дозволяє оцінити здатність матеріалу до структурної адаптації, що є важливим критерієм для його подальшого використання в композиційних системах.

У попередньому етапі дослідження було встановлено, що полімерний матеріал Zedex zx-100k демонструє позитивну тенденцію до зміцнення в зоні контакту навіть при високих швидкостях ковзання [1]. Це свідчить про його здатність зберігати структурну цілісність та протистояти зношуванню, що робить його перспективним для застосування у складних умовах експлуатації. Виявлене явище структурної адаптації [2] стало підґрунтям для розширення дослідження на композиційні матеріали з більш складним складом.

У межах даної роботи проведено триботестування трьох типів матеріалів: графітовмісного композиту ПС6 (полістирол + графіт), промислового композиційного матеріалу Zedex zx-324V2T (РЕЕК + РТФЕ), а також експериментальних зразків, виготовлених на базі університету з епоксидної смоли Ерікоте LR285 з додаванням графіту. Всі випробування здійснювалися за аналогічних умов, що дозволяє порівняти результати з попереднім етапом та оцінити вплив складу матеріалу на його трибологічну поведінку.

Метою дослідження є визначення закономірності зміни мікротвердості композиційних матеріалів та оцінити їх здатність до структурної адаптації. Особливу увагу приділено порівнянню промислових зразків із експериментально виготовленими композитами, що дає змогу оцінити ефективність різних підходів до формування матриці та наповнювача.

Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації складу полімерних композитів, призначених для роботи у вузлах тертя.

Матеріали та методи дослідження.

Для проведення експериментів було відібрано три типи полімерних композитів, що відрізняються складом та функціональними властивостями.

- Zedex zx-324V2T (PEEK + PTFE) — промисловий композиційний матеріал, який поєднує високу термостійкість та механічну міцність поліефіркетону (PEEK) із низьким коефіцієнтом тертя та антифрикційними властивостями політетрафторетилену (PTFE). Завдяки цьому матеріал використовується у вузлах ковзання та підшипниках, що працюють у складних умовах навантаження.

- Композит ПС-6 (полістирол + графіт) був виготовлений методом суспензійної полімеризації, що забезпечує рівномірний розподіл графітових частинок у структурі матеріалу. Згідно з літературними даними, введення графіту впливає на процес полімеризації: зі збільшенням його концентрації зростає час полімеризації та розмір частинок, зменшується конверсія мономеру та молекулярна маса порівняно з чистим полістиролом. При цьому отриманий матеріал характеризується низькою теплопровідністю ($0.0309 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$), що на 20.6% нижче, ніж у чистого EPS, та має однорідну структуру комірок із рівномірним розподілом графіту в стінках пінополістиролу ПС-6 — поєднує жорсткість полістиролу з антифрикційними властивостями графіту[3]. Використання графіту як наповнювача дозволяє знизити тертя та підвищити зносостійкість, що робить матеріал придатним для деталей, які працюють у режимах тертя ковзання[4].

Експериментальні композитні зразки були виготовлені у лабораторних умовах на базі епоксидної смоли Epikote LR285, модифікованої введенням графітового порошку у трьох концентраціях: 7.9%, 14.6% та 20.5%. Смола характеризується такими параметрами:

- Щільність: $1.18\text{--}1.23 \text{ г/см}^3$
- В'язкість: $600\text{--}900 \text{ мПа}\cdot\text{с}$
- Індекс вогнетривкості: $1.525\text{--}1.530$

Для затвердіння системи використовувався відповідний затверджувач, який має:

- Щільність: $0.94\text{--}0.97 \text{ г/см}^3$
- В'язкість: $50\text{--}100 \text{ мПа}\cdot\text{с}$
- Індекс вогнетривкості: $1.500\text{--}1.510$

Перед заливкою форми нагрівалися до $35 \text{ }^\circ\text{C}$, що сприяло рівномірному розподілу графітового наповнювача та зменшенню ризику осідання. Після формування зразки витримували при температурі $50\text{--}55 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом доби для забезпечення повного затвердіння.

Після термообробки при $50\text{--}55 \text{ }^\circ\text{C}$ отримані композити демонструють стабільність властивостей у робочому діапазоні температур від $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+54 \text{ }^\circ\text{C}$, що відповідає умовам експлуатації підшипників ковзання у стандартних режимах[5]. Для забезпечення працездатності матеріалу у вузлах тертя з підвищеним тепловим навантаженням (до $+72 \text{ }^\circ\text{C}$) необхідна додаткова термообробка при $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Усі зразки перед випробуваннями проходили стандартну підготовку: очищення від забруднень та знежирення, що забезпечувало відтворюваність результатів та мінімізувало вплив сторонніх факторів.

Для кожного матеріалу досліджувалася одна пара зразків 8×100 мм. Експерименти проводилися за трьома режимами швидкості ковзання: 1.4, 2.8 та 5.5 м/с, що дозволяло оцінити вплив інтенсивності навантаження на трибологічну поведінку матеріалів.

Контр тіло виготовлено зі сталі 30ХГСА (HRC = 43, Ra = 0.37 мкм). Контактна взаємодія створювала стандартні умови навантаження та забезпечувала повторюваність результатів тестування.

Вимірювання мікротвердості проводили за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 з алмазним індентором. Мікротвердість оцінювалася для вихідної поверхні та для поверхні у зоні контактної доріжки після триботестування, що дозволяло оцінити вплив тертя на зміни трибологічних характеристик. Навантаження при вдавненні індентора складало 0.39 Н для всіх зразків.

Результати дослідження мікротвердості та вагового зносу композиційних полімерних матеріалів після триботестування наведені в таблиці 1. Аналіз отриманих даних свідчить про суттєву різницю в характері змін мікротвердості залежно від складу матеріалу та типу полімерної матриці.

Таблиця 1

Результати аналізу змін мікротвердості полімерних матеріалів

Матеріал	Мікротвердість H ₄₀ (МПа)				Ваговий знос (г)
	Вихідна поверхня	Доріжка тертя	ΔH		Δm
Epikote LR285 (Graphite 7.9%)	535	352	183	зменшення	0.1182
Epikote LR285 (Graphite 14.6%)	405	284	121	зменшення	0.1021
Epikote LR285 (Graphite 20.5%)	244	183	61	зменшення	0.0827
ПС-6	111	175	64	зменшення	0.0402
Zedex zx-324V2T №1 (1.4м/с)	228	233	5	зменшення	0.0075
Zedex zx-324V2T №2 (2.8 м/с)	229	383	154	зменшення	0.0043
Zedex zx-324V2T №3 (5.5м/с)	228	533	305	зменшення	0.0033

Експериментальні композити на основі епоксидної смоли Epikote LR285 із графітовим наповнювачем продемонстрували зменшення мікротвердості після триботестування для всіх концентрацій графіту. Найвищий рівень зменшення

спостерігався для зразка з вмістом графіту 7.9%, де ΔH становить 183 МПа, тоді як при підвищенні концентрації наповнювача до 20.5% показник мікротвердості зменшується на 61 МПа. Така тенденція свідчить про стабілізуючий вплив графітового наповнювача на структуру полімерної матриці, що знижує інтенсивність руйнування під час тертя. Проте навіть за максимального вмісту графіту спостерігається загальна тенденція до знеміцнення, що зумовлено локальним перегрівом у зоні тертя та частковою термодеструкцією епоксидної основи.

Іншу поведінку продемонстрував полістирольний композит ПС-6, у якого спостерігається зростання мікротвердості після триботестування ($\Delta H = 64$ МПа). Це свідчить про наявність процесів структурної адаптації, що відбуваються внаслідок механічної орієнтації макромолекул і часткового ущільнення поверхневого шару матеріалу. Паралельно було зафіксовано відносно низький ваговий знос ($\Delta m = 0.0402$ г), що підтверджує підвищену стабільність композиту при терті.

На рисунку 1 наведено кінетик зміни мікротвердості та вагового зносу для досліджуваних композитів залежно від швидкості ковзання. Візуалізація результатів дозволяє чітко простежити тенденції зміцнення або знеміцнення матеріалів, а також оцінити ефективність графітового наповнювача при різних режимах навантаження.

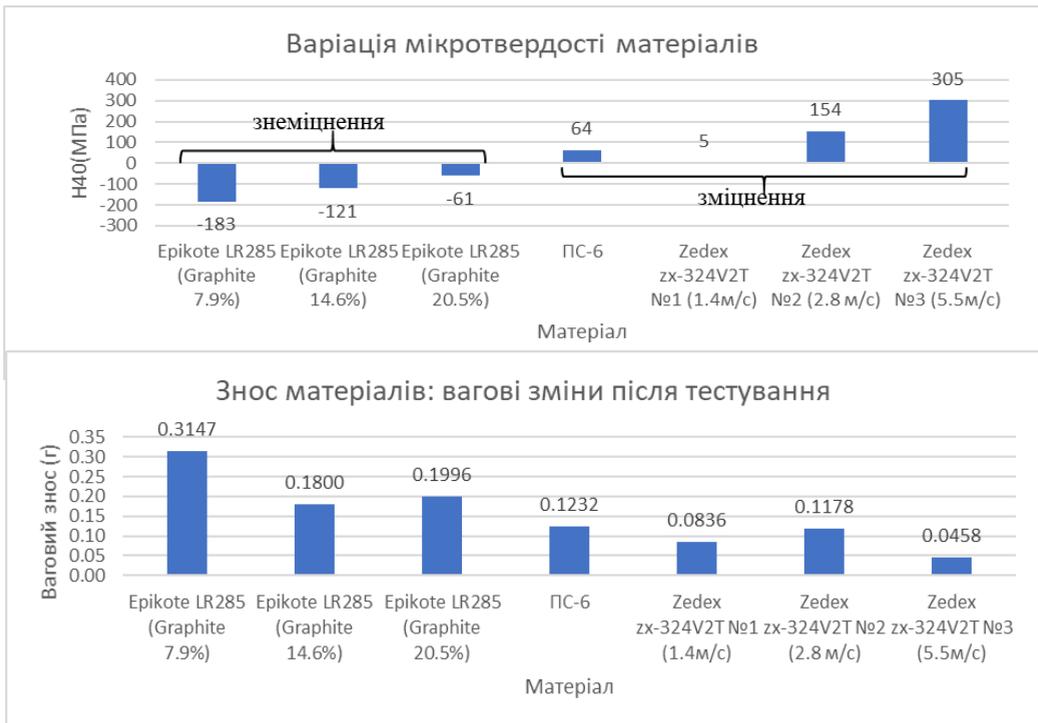


Рис. 1 Порівняння вагового зносу та мікротвердості матеріалів: результати експериментальних досліджень

Найбільш виражений ефект зміцнення зафіксовано для промислового композиційного матеріалу Zedex zx-324V2T (PEEK + PTFE). У всіх трьох режимах швидкості ковзання спостерігається підвищення мікротвердості в зоні

тертя, що свідчить про процес структурної адаптації матеріалу. При найнижчій швидкості ковзання (1.4 м/с) зміцнення незначне ($\Delta H = 5$ МПа), проте зі збільшенням швидкості до 2.8 м/с та 5.5 м/с значення ΔH зростає до 154 та 305 МПа відповідно. Це вказує на зростання впливу механічних та термічних навантажень, які сприяють орієнтації макромолекул поліефіркетону (РЕЕК) і локальному ущільненню матеріалу в зоні контакту.

Водночас ваговий знос Zedex zx-324V2T зменшується зі збільшенням швидкості ковзання (від 0.0075 г до 0.0033 г), що узгоджується з гіпотезою про формування на поверхні стабільної антифрикційної плівки, утвореної компонентом РТФЕ. Отже, матеріал демонструє одночасно низьку інтенсивність зносу та здатність до самозміцнення під дією триботестування.

Процеси зміцнення, зафіксовані для матеріалів на основі РЕЕК та полістиролу, можуть бути пояснені механічною орієнтацією макромолекул, ущільненням поверхневого шару та формуванням вторинних структур, здатних протистояти зношуванню. Натомість знеміцнення епоксидних композитів свідчить про обмежену термостійкість матриці та недостатню ефективність графітового наповнювача при високих локальних температурах.

Висновки. У результаті проведених трибологічних випробувань встановлено, що здатність полімерних композиційних матеріалів до структурної адаптації суттєво залежить від складу матриці, типу наповнювача та режиму навантаження.

Експериментальні композити на основі епоксидної смоли з графітовим наповнювачем демонструють тенденцію до знеміцнення, що зумовлено термочутливістю матриці та локальним перегрівом у зоні контакту.

Композит ПС-6 (полістирол + графіт) виявив здатність до зміцнення поверхневого шару, що свідчить про механічну орієнтацію макромолекул та ефективну структурну адаптацію.

Найбільш виражене зміцнення зафіксовано для матеріалу Zedex zx-324V2T (РЕЕК + РТФЕ), який демонструє зростання мікротвердості зі збільшенням швидкості ковзання, а також зменшення вагового зносу, що свідчить про формування стабільної антифрикційної плівки.

Таким чином, дослідження підтверджує, що структурна адаптація є перспективним механізмом підвищення зносостійкості полімерних композитів, а її інтенсивність залежить від фізико-хімічних властивостей компонентів та умов експлуатації.

Отримані результати можуть бути використані при розробці нових антифрикційних матеріалів для вузлів тертя, що працюють у складних умовах, зокрема в авіаційній, автомобільній та енергетичній галузях. Виявлені ефекти структурної адаптації відкривають перспективи для створення самозміцнюючих полімерних систем з прогнозованими експлуатаційними характеристиками

Список літератури

1. Marchuk, R.M., Mnatsakanov, R.G., Yashchuk, O.P., Kushch, O.I., Nyshchuk, D.V. Influence of tribotesting on microhardness of polymers. *Problems of Tribology*, 2025, vol. 30, no. 1(115), pp. 45–50. <https://doi.org/10.1080/15583724.2024.2406965>
2. Zhang, H., Wang, J., Wang, Y., Zhao, Y., Zhang, Y. Effects of graphite on styrene suspension polymerization and flame-retarded expandable polystyrene. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2016, vol. 32, no. 8, pp. 45–52.

3. Molinar-Díaz, J., Parsons, A.J., Ahmed, I., Warrior, N.A., Harper, L.T. Poly-Ether-Ether-Ketone (PEEK) Biomaterials and Composites: Challenges, Progress, and Opportunities. *Polymer Reviews*, 2025, vol. 65, no. 2, pp. 527–565. <https://doi.org/10.1080/15583724.2024.2406965>

4. Demir M.E. The effect of graphite addition on the friction coefficient and wear behavior of glass fiber reinforced composites. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*. 2024. Vol. 29, No. 1. pp. 113–124. DOI: 10.17482/uumfd.1374861.

5. Азаров Ж.Д. Доповідь – проф. Азаров Ж.Д., декан ФТФ. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2015. 12 с. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/10896/1.pdf?sequence=1>. (дата звернення: 12.11.2025).

Стаття надійшла до редакції 21.11.2025.

Марчук Роман Миколайович – аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Державне некомерційне підприємство «Державний університет Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, 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, Державне некомерційне підприємство «Державний університет Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, Email: mnatsakanov@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5035-2432>.

R.M. MARCHUK, R. G. MNATSAKANOV

TRIBOLOGICAL TESTING AND STRUCTURAL ADAPTATION OF POLYMER COMPOSITES

Polymer composites are increasingly applied in sliding friction units due to their low friction coefficient, chemical resistance, and ability to adapt structurally under mechanical loading. One of the key parameters determining their performance is microhardness, which may change during operation and thus reflect the material's capacity for structural adaptation. This study presents the results of tribological testing of several polymer composites, including industrial and laboratory-prepared materials, with a focus on microhardness variation and wear resistance under different sliding regimes.

Three types of composites were investigated:

- Zedex zx-324V2T (PEEK + PTFE): a commercial composite combining high thermal stability and mechanical strength of PEEK with the low friction and antiwear properties of PTFE.

- Polystyrene/graphite composite (PS-6): prepared by suspension polymerization, where graphite acts as a solid lubricant and reinforcement. Literature reports indicate that graphite addition influences polymerization kinetics, particle size, and molecular weight, while also reducing thermal conductivity and improving foam uniformity.

- Epoxy resin composites (Epikote LR285 + graphite): experimental samples fabricated with varying graphite concentrations (7.9%, 14.6%, 20.5%), cured under controlled thermal conditions to ensure homogeneous filler distribution.

Tribological tests were performed under three sliding speeds (1.4, 2.8, and 5.5 m/s) using steel counter bodies. Microhardness was measured before and after testing with a PMT-3 microhardness tester, while weight loss was recorded to evaluate wear. The results reveal distinct behaviors depending on composite type:

- Epoxy-based composites exhibited a decrease in microhardness after testing, with higher graphite content mitigating but not eliminating softening effects.

- The PS-6 composite demonstrated an increase in microhardness ($\Delta H = 64$ MPa), indicating structural adaptation through molecular orientation and surface densification, accompanied by relatively low wear.

- Zedex zx-324V2T showed the most pronounced strengthening effect, with microhardness increasing up to $\Delta H = 305$ MPa at higher sliding speeds, while wear decreased due to the formation of a stable PTFE-based transfer film.

These findings confirm that structural adaptation is a critical mechanism for enhancing the tribological performance of polymer composites. The degree of adaptation depends strongly on the polymer matrix and filler type.

Practical significance: The results provide guidance for optimizing composite formulations intended for sliding bearings and friction units operating under severe conditions. In particular, PEEK/PTFE systems and polystyrene/graphite composites demonstrate promising self-strengthening behavior, opening pathways for the development of advanced self-adaptive polymer materials for automotive, aerospace, and energy applications

Keywords: polymer composite materials; polystyrene; graphite; polytetrafluoroethylene (PTFE); polyetheretherketone (PEEK); microhardness; sliding speed; wear resistance; tribological properties.

References

1. Marchuk, R.M., Mnatsakanov, R.G., Yashchuk, O.P., Kushch, O.I., Nyshchuk, D.V. Influence of tribotesting on microhardness of polymers. *Problems of Tribology*, 2025, vol. 30, no. 1(115), pp. 45–50. <https://doi.org/10.1080/15583724.2024.2406965>

2. Zhang, H., Wang, J., Wang, Y., Zhao, Y., Zhang, Y. Effects of graphite on styrene suspension polymerization and flame-retarded expandable polystyrene. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2016, vol. 32, no. 8, pp. 45–52.

3. Molinar-Díaz, J., Parsons, A.J., Ahmed, I., Warrior, N.A., Harper, L.T. Poly-Ether-Ether-Ketone (PEEK) Biomaterials and Composites: Challenges, Progress, and Opportunities. *Polymer Reviews*, 2025, vol. 65, no. 2, pp. 527–565. <https://doi.org/10.1080/15583724.2024.2406965>

4. Demir, M.E. The effect of graphite addition on the friction coefficient and wear behavior of glass fiber reinforced composites. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 2024, vol. 29, no. 1, pp. 113–124. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1374861>

5. Azarov, Zh.D. Report – Prof. Zh.D. Azarov, Dean of Faculty of Physics and Technology. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2015, 12 p. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/10896/1.pdf?sequence=1>

(accessed November 12, 2025).

Marchuk Roman Mykolayovych – graduate student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, State Non-Commercial Company «State University «Kyiv Aviation Institute», 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](#), State Non-Commercial Company «State University «Kyiv Aviation Institute», 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: mnatsakanov@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5035-2432>