

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Марчук Роман Миколайович

УДК 692.533

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**«ПІДВИЩЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАР КОВЗАННЯ**  
**ПОЛІПШЕННЯМ ПРОТИЗНОШУВАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ**  
**ПОЛІМЕРНИХ ТА КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ»**

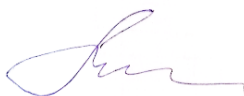
Спеціальність 131 – Прикладна механіка

Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подается на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело  
\_\_\_\_\_ Роман МАРЧУК

Науковий керівник: Мнацаканов Рудольф Георгійович, доктор технічних наук,  
професор



Київ – 2026

## АНОТАЦІЯ

Марчук Р. М. Підвищення триботехнічних характеристик пар ковзання поліпшенням протизношувальних властивостей полімерних та композиційних матеріалів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка». Державний університет «Київський авіаційний інститут» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2026.

Дисертація присвячена дослідженню закономірностей формування протизношувальних властивостей полімерних та композиційних матеріалів у вузлах тертя ковзання. Робота спрямована на виявлення механізмів структурної адаптації полімерних матриць та композитів з функціональними наповнювачами, що забезпечують зниження коефіцієнта тертя, стабілізацію температурного режиму та підвищення довговічності підшипників ковзання.

Актуальність дослідження визначається потребою у створенні високонадійних антифрикційних матеріалів для авіаційної, транспортної та енергетичної галузей, де вузли тертя працюють у режимах інтенсивних навантажень.

Мета роботи полягала в підвищенні зносостійкості підшипників ковзання за рахунок обґрунтованого вибору складу антифрикційних полімерних та полімерних композиційних матеріалів та методів контролю їхнього термічного стану та триботехнічних характеристик для забезпечення керованої структурної адаптації.

У **вступі** зазначені актуальність обраної теми, мета та завдання дослідження, наведено науково-дослідні роботи, в рамках яких проводилось дисертаційне дослідження, охарактеризовано застосовані методи дослідження, представлено особистий внесок здобувача, наукову новизну результатів дослідження та їх практичне значення.

**Перший розділ** включає комплексний науково-технічний аналіз сучасного стану та перспектив використання полімерних матеріалів у вузлах тертя авіаційної, транспортної та енергетичної галузей. Встановлено, що ефективність функціонування

підшипників ковзання та ущільнювальних елементів визначається раціональним поєднанням фізико-механічних властивостей матриці та цілеспрямованим впливом модифікуючих наповнювачів. Проведено систематизацію широкої номенклатури полімерів (PA6, PA66, PS, PET, POM, PEEK, PTFE), які за критеріями технологічності та термостійкості класифіковано на дві групи: інженерні термопласти загального призначення та високопродуктивні полімерні системи для критичних режимів експлуатації.

Розкрито функціональну роль наповнювачів різної природи та геометричної розмірності у формуванні триботехнічних характеристик композитів. Деталізовано механізми впливу армуючих волокон (CF, GF), твердих мастильних компонентів (графіт, MoS<sub>2</sub>, PTFE) та нанодисперсних часток (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CNTs) на стабілізацію коефіцієнта тертя та зміцнення міжфазного шару. Обґрунтовано, що створення силового каркаса та формування стійких плівок перенесення є ключовими чинниками підвищення зносостійкості, проте досягнення стійкого синергетичного ефекту в таких системах залишається складною науковою проблемою.

Особливу увагу приділено потенціалу використання нанодисперсного діоксиду кремнію (SiO<sub>2</sub>) як універсального модифікатора структури. Встановлено, що специфічна взаємодія SiO<sub>2</sub> з полімерними матрицями дозволяє суттєво підвищити триботехнічний ресурс матеріалів навіть за низьких концентрацій, проте механізми такого впливу потребують глибшого експериментального опрацювання. Сформульовано необхідність переходу від статичного опису властивостей до дослідження динаміки структурних трансформацій у зоні контакту.

На основі здійсненого аналітичного огляду було визначено мету дослідження, що полягає у встановленні закономірностей впливу модифікаторів на структуру та трибологічні характеристики обраних полімерів. Деталізовано завдання щодо експериментальної перевірки властивостей розроблених систем на спеціально створеній трибометричній установці, що дозволяє моделювати реальні умови експлуатації підшипників ковзання..

**В другому розділі** обґрунтовано вибір об'єктів дослідження, представлено технологічні регламенти їх підготовки та описано експериментально-технічну базу для комплексного аналізу трибологічної поведінки полімерних композитів. Об'єкти дослідження структуровано за двома групами: промислові інженерні термопласти (Sustamid, Sustapeek, Zedex), що виконують роль еталонних матеріалів, та експериментальні композити на основі реактопластичної матриці Epikote LR285. Доведено доцільність використання епоксидної матриці як основи для антифрикційних систем, що забезпечує високу розмірну стабільність та опір повзучості в умовах інтенсивного фрикційного нагріву. Описано режим багатоступеневої полімеризації з фінальною стабілізацією при 80 °С, що дозволило отримати зразки з прогнозованими фізико-механічними характеристиками.

Методологія триботехнічних випробувань базується на критичному аналізі міжнародних стандартів (ISO 7148-2, ASTM G99/G77) із застосуванням схеми «блок-на-кільці» (Method B). Встановлено, що така конфігурація контакту забезпечує найбільш адекватне моделювання роботи реальних підшипників ковзання за рахунок конформності пари тертя та ефективного відведення надлишкової теплоти через сталеве контртіло (сталь 30ХГСА). Це дозволило мінімізувати ризики передчасної термічної деструкції та дослідити динаміку процесів у широкому діапазоні швидкостей ковзання (1.4–5.5 м/с).

Особливу увагу приділено прецизійному метрологічному забезпеченню експериментів. Розроблено та впроваджено систему температурного моніторингу на основі платинових термодетекторів Pt100, інтегрованих безпосередньо в тіло зразка. Застосування чотирипровідної схеми підключення та математичне опрацювання сигналів за допомогою поліноміальних рівнянь ITS-90 (6-го порядку) у поєднанні з безконтактною інфрачервоною пірометрією гарантує високу роздільну здатність та верифікацію термічних градієнтів у реальному часі. Метрологічне підтвердження характеристик створеної установки в умовах лабораторії, акредитованої за стандартом

ISO/IEC 17025, забезпечує високу відтворюваність результатів та створює надійний фундамент для впровадження розроблених рішень.

Запропонована комплексна методика, що поєднує трибOMETричний контроль із подальшим аналізом зміни мікротвердості поверхонь, дозволяє ідентифікувати механізми структурної адаптації матеріалів. Це створює методичну базу для наступних етапів дослідження, спрямованих на створення самозміцнювальних антифрикційних систем підшипникового призначення.

**У третьому розділі** представлено результати комплексного експериментального дослідження триботехнічних та фізико-механічних властивостей широкого спектра конструкційних полімерів. Методологія роботи базується на системному підході, що поєднує прямі вимірювання вагового зносу з безконтактним моніторингом температурних полів та лазерною профілометрією. Застосування прецизійної ІЧ-пірометрії та диференційно-фазової мікроскопії дозволило виключити механічний вплив на в'язкопружну матрицю, забезпечивши високу достовірність даних. На основі скринінгових випробувань (Sustamid, Sustapei, Sustapeek, Zedex та ін.) ідентифіковано найбільш трибологічно стабільні матеріали та відсіяно зразки, схильні до інтенсивної термічної деградації. Встановлено, що введення змащувальних модифікаторів у структуру поліамідів (SusTamid 6G OL) забезпечує зниження моменту тертя на 17.5 % та стабілізацію теплового режиму на рівні 60 °C, що мінімізує ризики термомеханічного розм'якшення. За допомогою апарату кривих Аббота-Файєрстоуна кількісно описано розвиток мікрогеометрії поверхонь тертя. Виявлено діапазон оптимальних швидкостей ковзання (близько 2.8 м/с), за яких спостерігається максимальне згладжування мікронерівностей (зниження  $R_a$  до 0.003 мкм) та зростання несучої здатності поверхні до 71 %. Вихід за межі цього режиму ініціює перехід до термічного зношування з падінням опорної здатності у 1.9 раза. Особливу увагу приділено дослідженню мікротвердості доріжки тертя як індикатора структурної адаптації. Класифіковано полімери за їхньою здатністю до самозміцнення: встановлено, що на відміну від традиційних поліамідів, схильних до знеміцнення, матеріали типу Zedex zx-100k та

Sustadur PET виявляють позитивну динаміку  $\Delta H$  за рахунок орієнтаційної кристалізації макромолекул. Математично обґрунтовано взаємозв'язок між термічним режимом та структурним станом поверхонь. Виявлено помітний зворотний кореляційний зв'язок ( $r = -0.65$ ) між максимальною температурою  $T_{\max}$  та коефіцієнтом зміцнення  $K_h$ , що підтверджує деструктивну роль інтенсивного тепловиділення для більшості термопластів. Доведено існування сильної зворотної кореляції ( $r = -0.88$ ) між показником зміцнення  $K_h$  та інтенсивністю вагового зносу  $I_g$ . Це дозволяє використовувати мікротвердість доріжки тертя як надійний предиктивний індикатор триботехнічного ресурсу. Отримані експериментальні залежності складають основу для подальшого теоретичного обґрунтування процесів самозмашування та розробки високонавантажених композиційних підшипників ковзання, результати якої представлені у наступному розділі.

**У четвертому розділі** реалізовано методологічний перехід від вивчення базових характеристик інженерних пластиків до проектування та аналізу багатокомпонентних антифрикційних систем. Пріоритетну увагу приділено розробці експериментальних епоксиграфітових композитів на базі реактопластичної матриці та їхньому порівняльному оцінюванню з промисловими стандартами на основі полієфірефіркетону та модифікованого полістиролу. Такий підхід дозволив встановити закономірності керування процесами структурної адаптації через цілеспрямоване введення функціональних наповнювачів із різними механізмами дисипації енергії.

Доведено, що введення дисперсного графіту в структуру реактопластів ініціює механізм термічної стабілізації вузла тертя за рахунок формування стійкої антифрикційної плівки, яка виконує роль теплового демпфера. Виявлено ефект саморегулювання трибосистеми, що проявляється у виході на температурне плато після стадії припрацювання. Це явище пояснюється динамічною зміною коефіцієнта тертя, що запобігає термомеханічній деструкції поверхневого шару та забезпечує збереження його структурної цілісності в умовах інтенсивних швидкісних режимів.

Обґрунтовано концепцію активної трансформації енергії тертя у ресурс самозміцнення матеріалу. Встановлено, що для певних типів композитів термічна напруженість виступає активатором орієнтаційної перебудови макромолекул, що призводить до суттєвого зростання мікротвердості доріжки тертя. Математично доведено фундаментальний взаємозв'язок між здатністю до формування захисного наклепу та інтенсивністю зношування, що дозволяє розглядати показники зміцнення поверхонь як предиктивні індикатори довговічності.

Синтез отриманих результатів дозволив сформулювати узагальнену модель триботехнічної надійності композиційних систем. Встановлені закономірності складають науково-практичну основу для створення нового покоління антифрикційних матеріалів, здатних до керованої адаптації у високонавантажених вузлах тертя авіаційної та наземної техніки.

### **Наукова новизна одержаних результатів визначається наступним.**

#### *Вперше:*

– Встановлено фундаментальну роль процесів фрикційного зміцнення полімерних та полімерних композиційних матеріалів у забезпеченні довговічності вузлів тертя, які полягають у підвищенні зносостійкості за рахунок формування трибоплівки з підвищеною мікротвердістю, структурною орієнтацією, низьким опором зсуву в умовах ковзання.

– Встановлено, що на відміну від полімерів на основі поліамідів, які схильні до знеміцнення внаслідок механодеструкції молекулярних зв'язків, матеріали на основі термопластичних поліестерів (PET), полієфірефіркетону (PEEK) та політетрафторетилену (PTFE) забезпечують зміцнення поверхневого шару в умовах ковзання шляхом формування структурної орієнтації макромолекул і зростання щільності фазової плівки за рахунок вторинної кристалізації під дією термомеханічного навантаження, що підвищує опірність матеріалу до зношування.

*Удосконалено:*

– теорію структурної адаптації при терті полімерних та полімерних композиційних матеріалів: встановлено кореляцію між максимальною температурою контакту та коефіцієнтом зміцнення поверхні на основі оцінки процесів інтенсивності тепловиділення, які ініціюють термомеханічне розм'якшення матриці та знижують інтенсивність зношування.

– оцінку несучої здатності поверхні полімерних та полімерних композиційних матеріалів на основі мікрогеометричних показників кривої Аббота-Файерстоуна: встановлено вплив швидкості ковзання на показник центральної частини середньої відносної опорної довжини профілю, що свідчить про формування розвиненого «плато» мікрорельєфу, яке забезпечує максимальну стабільність контакту, рівномірний розподіл питомих тисків та мінімізацію локальних напружень.

*Отримали подальший розвиток:*

– наукові уявлення про підвищення зносостійкості полімерних матеріалів шляхом введення в їх структуру компонентів, що забезпечують підвищення антифрикційних характеристик матеріалів та знижують ризик теплової деструкції їх поверхневого шару при терті.

– теорія формування зносостійких структур при терті полімерів та полімерних композиційних матеріалів: введення дисперсного графіту в епоксидну матрицю забезпечує реалізацію механізму термічної стабілізації вузла тертя формуванням графітової трибоплівки, яка проявляє високі антифрикційні властивості.

### **Практичне значення одержаних результатів:**

1. Розроблено та впроваджено методику виготовлення та термічної стабілізації високопродуктивних епоксиграфітових композитів для вузлів тертя. Запропонований підхід забезпечує високу гомогенність розподілу графіту (до 20,5% за масою) та формування стабільної тривимірної молекулярної сітки, що дозволяє замінювати промислові термопласти (РА6, РОМ, РЕЕК) у високонавантажених вузлах. Результати реалізовані у виробничу діяльність ТОВ «НД Продакшн» для створення антифрикційних

матеріалів із прогнозованою мікроструктурою та підвищеною теплопровідністю (акт про реалізацію результатів наукових досліджень від 09.10.2025 року)

2. Впроваджено у навчальний процес Державного університету «Київський авіаційний інститут» (КАІ): у тематичний план лекцій, практичних та лабораторних занять з дисципліни «Технології конструкційних матеріалів» для здобувачів вищої освіти ступеня «Бакалавр» включено теоретичні та практичні питання щодо застосування сучасних полімерних композиційних матеріалів для підшипників ковзання та технологій їх виготовлення; при підготовці кваліфікаційних робіт для здобувачів ступеня «Магістр» зі спеціальності 272 «Авіаційний транспорт» використовуються розроблені технологічні заходи підвищення зносостійкості деталей авіаційних трибомеханічних систем (акт про впровадження в навчальний процес від 07.01.2026 року).

3. Розроблено та впроваджено методика оцінки протизношувальних властивостей полімерних та композиційних матеріалів, яка дозволяє визначати стійкість до деформації, кінетику зміни мікротвердості та здатність до структурної адаптації під дією термомеханічних навантажень. Методика базується на моніторингу температурних полів системою датчиків Pt100 , відповідає вимогам міжнародного стандарту ISO 7148-2:2026 та впроваджена на ТОВ «Луцький ремонтний завод «Мотор»» для обґрунтованого вибору матеріалів підшипників ковзання (акт про реалізацію результатів наукових досліджень від 11.02.2026 року) .

**Ключові слова:** тертя, тертя ковзання, знос, зносостійкість, підшипникові вузли, метало-полімерні підшипники ковзання, композити, триботехнічні властивості, коефіцієнт тертя, температура, рельєф поверхні, твердість.

## ABSTRACT

Marchuk R. M. Enhancement of Tribological Characteristics of Sliding Pairs by Improving the Anti-Wear Properties of Polymer and Composite Materials. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 131 “Applied Mechanics”. State University “Kyiv Aviation Institute” of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to the study of the regularities of forming anti-wear properties of polymer and composite materials in sliding friction units. The work focuses on identifying the mechanisms of structural adaptation of polymer matrices and composites with functional fillers, which ensure the reduction of the friction coefficient, stabilization of the thermal regime, and increase of the durability of sliding bearings.

The relevance of the study is determined by the need to create highly reliable anti-friction materials for the aviation, transport, and energy industries, where friction units operate under intensive load conditions.

The purpose of the work is the development and experimental verification of polymer composites with enhanced tribological resource, as well as the formation of a concept of controlled structural adaptation of surface layers.

**In the introduction**, the relevance of the chosen topic, the purpose and objectives of the study are outlined; the research projects within which the dissertation was carried out are presented; the applied research methods are characterized; the personal contribution of the applicant, the scientific novelty of the results, and their practical significance are highlighted.

**The first chapter** includes a comprehensive scientific and technical analysis of the current state and prospects of using polymer materials in friction units of aviation, transport, and energy industries. It was established that the efficiency of sliding bearings and sealing elements is determined by the rational combination of the physical-mechanical properties of the matrix and the targeted influence of modifying fillers. A systematization of a wide range of

polymers (PA6, PA66, PS, PET, POM, PEEK, PTFE) was carried out, which, according to criteria of processability and thermal stability, were classified into two groups: engineering thermoplastics of general purpose and high-performance polymer systems for critical operating conditions.

The functional role of fillers of different nature and geometric dimensionality in forming the tribological characteristics of composites is revealed. The mechanisms of influence of reinforcing fibers (CF, GF), solid lubricating components (graphite, MoS<sub>2</sub>, PTFE), and nanodispersed particles (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CNTs) on the stabilization of the friction coefficient and strengthening of the interphase layer are detailed. It is substantiated that the creation of a structural framework and the formation of stable transfer films are key factors in increasing wear resistance, but achieving a stable synergistic effect in such systems remains a complex scientific problem.

Special attention is paid to the potential of using nanodispersed silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>) as a universal structure modifier. It was established that the specific interaction of SiO<sub>2</sub> with polymer matrices allows a significant increase in the tribological resource of materials even at low concentrations, but the mechanisms of such influence require deeper experimental study. The necessity of moving from a static description of properties to the study of the dynamics of structural transformations in the contact zone is formulated.

Based on the analytical review, the purpose of the study was defined as establishing the regularities of the influence of modifiers on the structure and tribological characteristics of selected polymers. The tasks of experimental verification of the properties of the developed systems on a specially created tribometric installation, which allows modeling real operating conditions of sliding bearings, were detailed.

**The second chapter** substantiates the choice of research objects, presents technological regulations for their preparation, and describes the experimental and technical base for comprehensive analysis of the tribological behavior of polymer composites. The research objects are structured into two groups: industrial engineering thermoplastics (Sustamid, Sustapeek, Zedex), which serve as reference materials, and experimental composites based on

the thermosetting matrix Epikote LR285. The expediency of using an epoxy matrix as the basis for anti-friction systems is proven, as it provides high dimensional stability and resistance to creep under conditions of intensive frictional heating. The regime of multi-stage polymerization with final stabilization at 80 °C is described, which made it possible to obtain samples with predictable physical and mechanical characteristics.

**The third chapter** presents the results of a comprehensive experimental study of tribological and physico-mechanical properties of a wide range of structural polymers. The methodology is based on a systemic approach combining direct measurements of weight wear with non-contact monitoring of thermal fields and laser profilometry. The use of precision IR pyrometry and differential-phase microscopy eliminated mechanical interference with the viscoelastic matrix, ensuring high reliability of the data.

Based on screening tests (Sustamid, Sustapei, Sustapeek, Zedex, etc.), the most tribologically stable materials were identified, while samples prone to intensive thermal degradation were excluded. It was established that the introduction of lubricating modifiers into the structure of polyamides (SusTamid 6G OL) provides a 17.5% reduction in friction torque and stabilization of the thermal regime at 60 °C, minimizing risks of thermomechanical softening. Using Abbott-Firestone curves, the development of microgeometry of friction surfaces was quantitatively described. An optimal sliding speed range (~2.8 m/s) was identified, at which maximum smoothing of micro-roughness (Ra reduction to 0.003 μm) and an increase in load-bearing capacity up to 71% were observed. Exceeding this regime initiates a transition to thermal wear with a 1.9-fold decrease in load-bearing capacity.

Special attention was paid to the study of microhardness of the friction track as an indicator of structural adaptation. Polymers were classified according to their ability to self-strengthen: unlike conventional polyamides prone to softening, materials such as Zedex ZX-100K and Sustadur PET demonstrated positive  $\Delta H$  dynamics due to orientational crystallization of macromolecules. A mathematical relationship between the thermal regime and the structural state of surfaces was substantiated. A noticeable inverse correlation ( $r = -0.65$ ) between maximum temperature  $T_{\max}$  and strengthening coefficient  $K_h$  was revealed,

confirming the destructive role of intensive heat release for most thermoplastics. A strong inverse correlation ( $r = -0.88$ ) between strengthening coefficient  $K_h$  and wear intensity  $I_g$  was established, allowing microhardness of the friction track to be used as a reliable predictive indicator of tribological resource. The obtained experimental dependencies form the basis for further theoretical substantiation of self-lubrication processes and the development of high-load composite sliding bearings, the results of which are presented in the next chapter.

**The fourth chapter** implements a methodological transition from the study of basic characteristics of engineering plastics to the design and analysis of multicomponent anti-friction systems. Priority attention is given to the development of experimental epoxy-graphite composites based on a thermosetting matrix and their comparative evaluation with industrial standards based on polyetheretherketone and modified polystyrene. This approach made it possible to establish regularities of controlling structural adaptation processes through targeted introduction of functional fillers with different energy dissipation mechanisms.

It was proven that the introduction of dispersed graphite into the structure of thermosets initiates a mechanism of thermal stabilization of the friction unit due to the formation of a stable anti-friction film acting as a thermal damper. An effect of self-regulation of the tribosystem was revealed, manifested in reaching a thermal plateau after the running-in stage. This phenomenon is explained by the dynamic change of the friction coefficient, which prevents thermomechanical destruction of the surface layer and ensures preservation of its structural integrity under intensive high-speed regimes.

The concept of active transformation of frictional energy into a resource of material self-strengthening was substantiated. It was established that for certain types of composites, thermal stress acts as an activator of orientational rearrangement of macromolecules, leading to a significant increase in microhardness of the friction track. A fundamental mathematical relationship between the ability to form a protective work-hardened layer and wear intensity was demonstrated, allowing strengthening indicators to be considered predictive markers of durability.

The synthesis of the obtained results enabled the formulation of a generalized model of tribological reliability of composite systems. The established regularities form the scientific and practical basis for the creation of a new generation of anti-friction materials capable of controlled adaptation in high-load friction units of aviation and ground engineering.

**Scientific Novelty of the Obtained Results is Defined as Follows.**

*For the first time:*

– The fundamental role of frictional hardening processes in polymer and polymer composite materials has been established in ensuring the durability of friction units. This role consists in increasing wear resistance through the formation of a tribofilm characterized by enhanced microhardness, structural orientation, and low shear resistance under sliding conditions.

– It was established that, unlike polyamide-based polymers which are prone to softening due to the mechanodestruction of molecular bonds, materials based on thermoplastic polyesters (PET), polyetheretherketone (PEEK), and polytetrafluoroethylene (PTFE) provide surface layer hardening during sliding. This is achieved through the structural orientation of macromolecules and an increase in the density of the phase film due to secondary crystallization under thermomechanical loading, which enhances the material's wear resistance.

*Improved:*

– The theory of structural adaptation during friction of polymer and polymer composite materials: a correlation was established between the maximum contact temperature and the surface hardening coefficient based on an assessment of heat generation intensity processes, which initiate thermomechanical softening of the matrix and reduce wear rate.

– The assessment of the load-bearing capacity of the surface of polymer and polymer composite materials based on the microgeometric parameters of the Abbott-Firestone curve: the influence of sliding speed on the core roughness depth (central part of the material ratio curve) was established. This indicates the formation of a developed "plateau" microrelief, which ensures maximum contact stability, uniform distribution of specific pressures, and minimization of local stresses.

*Further developed:*

– Scientific insights into increasing the wear resistance of polymer materials by introducing components into their structure that enhance anti-friction characteristics and reduce the risk of thermal degradation of the surface layer during friction.

– The theory of wear-resistant structure formation during the friction of polymers and polymer composites: the introduction of dispersed graphite into an epoxy matrix ensures the implementation of a thermal stabilization mechanism of the friction unit through the formation of a graphite tribofilm, which exhibits high anti-friction properties.

**Practical Significance of the Obtained Results:**

1. A methodology for the production and thermal stabilization of high-performance epoxy-graphite composites for friction units has been developed and implemented. The proposed approach ensures high homogeneity of graphite distribution (up to 20.5% by weight) and the formation of a stable three-dimensional molecular network, which allows for the replacement of industrial thermoplastics (PA6, POM, PEEK) in high-load units. The results have been implemented into the production activities of "ND Production" LLC to create antifriction materials with a predicted microstructure and enhanced thermal conductivity (Certificate of Implementation of scientific research results dated October 9, 2025).

2. Implemented into the educational process of the National University "Kyiv Aviation Institute" (KAI): theoretical and practical issues regarding the use of modern polymer composite materials for plain bearings and their manufacturing technologies have been included in the thematic plan of lectures, practical, and laboratory classes in the discipline "Technologies of Construction Materials" for Bachelor's degree students; for the preparation of qualification works for Master's degree students in specialty 272 "Aviation Transport," the developed technological measures for increasing the wear resistance of aviation tribomechanical system parts are utilized (Certificate of Implementation in the educational process dated January 7, 2026).

3. A methodology for evaluating the anti-wear properties of polymer and composite materials has been developed and implemented, allowing for the determination of specimen

deformation resistance, microhardness change kinetics in the friction zone, and the material's ability for structural adaptation under thermomechanical loads. The methodology is based on monitoring temperature fields using a Pt100 sensor system, complies with the requirements of the international standard ISO 7148-2:2026, and has been implemented at "Lutsk Repair Plant 'Motor'" LLC for the justified selection of plain bearing materials (Certificate of Implementation of scientific research results dated February 11, 2026).

Keywords: friction, sliding friction, wear, wear resistance, bearing units, metal-polymer plain bearings, composites, tribotechnical properties, friction coefficient, temperature, surface relief, surface hardening.

## Список публікацій здобувача

### У фахових виданнях категорії Б:

1. **Марчук Р.**, Мнацаканов Р. Аналіз полімерних композиційних матеріалів для підшипників ковзання. *Problems of Friction and Wear*. 2023. № 1(98). С. 55–62. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(98\).17359](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(98).17359)
2. **Марчук Р.**, Мнацаканов Р. Трибометрична машина для дослідження трибологічних характеристик полімерів. *Problems of Friction and Wear*. 2023. № 2(99). С. 32–38. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(99\).17624](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(99).17624)
3. **Марчук Р.**, Мнацаканов Р. Аналіз та інтерпретація зносу полімерних матеріалів на основі трибометричних досліджень. *Problems of Friction and Wear*. 2023. № 4(101). С. 52–59. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(101\).18079](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(101).18079)
4. **Марчук Р.**, Мнацаканов Р. Аналіз основних функціональних параметрів шорсткості мікрорельєфу поверхні полімерів. *Problems of Friction and Wear*. 2024. № 2(103). С. 130–139. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(103\).18695](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(103).18695)
5. **Marchuk R.**, Mnatsakanov R., Yashchuk O. P., Kushch O. I., Nyshchuk D. Influence of tribotesting on microhardness of polymers. *Problems of Tribology*. 2025. Т. 30, № 1/115. С. 45–50. URL: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2025-115-1-45-50>
6. **Марчук Р.**, Мнацаканов Р. Трибологічні випробування та структурна адаптація полімерних композитів. *Problems of Friction and Wear*. 2026. № 4(109). С. 131–138. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(109\).20761](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(109).20761)

### Опубліковані праці апробаційного характеру:

7. Малярчук І. В., Мікосянчик О. О., Педан Є. В., **Марчук Р. М.** Вплив модифікаторів тертя на триботехнічні характеристики контакту. *ABIA-2023: матеріали XVI міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 18–20 квітня 2023 р., Київ, 2023*. С. 1.54–1.57. URL: <https://conference.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2022/paper/viewFile/8867/7018>.

8. Бахтіаров Я., **Марчук Р.** Підвищення експлуатаційних властивостей полімерних матеріалів для підшипників ковзання. *Політ. Сучасні проблеми науки: матеріали XXIII міжнар. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених*, м. Київ, 4–7 квітня 2023 р., Київ, 2023. С. 33–37.

9. Мнацаканов Р. Г., Погребняк Н. О., **Марчук Р.** Вплив швидкості ковзання на шорсткість та зносостійкість полімерних матеріалів. *Авіація в XXI столітті – Безпека в авіації та космічні технології: матеріали XI Всесвітнього конгресу*, м. Київ, 25–28 вересня 2024 р., Київ, 2024. С. 1.2.5–1.2.8.

URL: <https://congress.nau.edu.ua/2024/info/Congress-2024.pdf>.

10. Турчаненко М., **Марчук Р.** Дослідження властивостей полімерних матеріалів та їх можливе застосування: переваги і недоліки. *Політ. Сучасні проблеми науки: матеріали XXIV міжнар. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених*, м. Київ, 2–5 квітня 2024 р., Київ, 2024. С. 41–42.

URL: <https://aki.kai.edu.ua/wpcontent/uploads/%d0%9f%d0%be%d0%bb%d1%96%d1%8224 %d0%90%d0%9a%d0%a4.pdf>

11. Нищук Д. В., **Марчук Р. М.** Оцінка мікротвердості полімерів при терті ковзання. *Політ. Сучасні проблеми науки: матеріали XXV міжнар. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених*, м. Київ, 1–4 квітня 2025 р., Київ, 2025. – С. 52–53.

URL: [https://nau.edu.ua/site/variables/docs/docsmenu/studnauka/polit2025/Polit-2025\\_AKF.pdf](https://nau.edu.ua/site/variables/docs/docsmenu/studnauka/polit2025/Polit-2025_AKF.pdf)

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ .....	30
1.1 Полімерні матриці для трибологічних композитів .....	31
1.1.1 Поліаміди (РА6, РА66): базові інженерні термопласти для вузлів тертя. ....	31
1.1.2 Полістирол (PS): економічний матеріал з обмеженою зносостійкістю. ....	34
1.1.3 Поліетилентерефталат (РЕТ): баланс міцності та термостійкості.....	37
1.1.4 Полієфірефіркетон (РЕЕК): високопродуктивна матриця для критичних режимів.....	39
1.1.5 Політетрафторетилен (РТФЕ): самозмащувальний полімер із винятковою хімістійкістю. ....	42
1.1.6 Поліацеталь (РОМ): конструкційний полімер із низьким коефіцієнтом тертя. ....	46
1.2 Наповнювачі та модифікатори полімерних композитів триботехнічного призначення.....	53
1.2.1 Вуглецеві волокна (CF): армування та підвищення міцності. ....	54
1.2.2 Скловолокна (GF): жорсткість і стабільність структури. ....	55
1.2.3 Графіт: формування плівок перенесення та зниження тертя.....	56
1.2.4 Дисульфід молібдену (MoS <sub>2</sub> ): тверде мастило для стабілізації коефіцієнта тертя.....	57
1.2.5 РТФЕ як наповнювач: синергія з полімерною матрицею. ....	58
1.2.6 Діоксид кремнію (SiO <sub>2</sub> ): наномодифікація та структурна адаптація. ....	59
1.2.7 Оксид алюмінію (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ): підвищення зносостійкості та теплопровідності.....	61

	20
1.2.8 Вуглецеві нанотрубки (CNTs): нанопідсилення та міжфазне зміцнення.....	61
Висновки до розділу 1. ....	64
<b>РОЗДІЛ 2. ОБ’ЄКТИ, МЕТОДИКИ ТА УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПКМ.....</b>	<b>66</b>
2.1 Об’єкти дослідження та їх підготовка .....	67
2.1.1 Промислові термопластичні матеріали.....	67
2.1.2 Розробка та склад експериментальних композитів на основі реактопластичної матриці.....	70
2.2. Експериментальна установка для дослідження процесів тертя та зношування ....	74
2.2.1. Класифікація основних методів трибологічних випробувань полімерних композитів .....	74
2.2.2 Метрологічне забезпечення та системи моніторингу параметрів трибосполучення.....	79
2.2.3 Технічні характеристики та кінематична схема експериментальної установки .....	83
Висновки до розділу 2. ....	87
<b>РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ПРОЦЕСІВ СТРУКТУРНОЇ АДАПТАЦІЇ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ .....</b>	<b>89</b>
3.1. Кінетика зношування та антифрикційні властивості досліджуваних матеріалів за різних навантажувально-швидкісних режимів.....	90
3.2. Аналіз мікрогеометрії та еволюція морфології поверхонь тертя. ....	97
3.3. Дослідження мікротвердості та оцінка структурної адаптації поверхонь полімерів за фрикційної взаємодії .....	102

3.4. Кореляційний аналіз взаємозв'язків між термічними, структурними та триботехнічними характеристиками поверхонь .....	112
Висновки до розділу 3. ....	117
<b>РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТА КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ І ПРОЦЕСІВ СТРУКТУРНОЇ АДАПТАЦІЇ АНТИФРИКЦІЙНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ СИСТЕМ .....</b>	<b>119</b>
4.1. Обґрунтування вибору компонентів та технології формування композитів для триботехнічних досліджень.....	120
4.2. Аналіз закономірностей формування вторинних структур за параметрами тертя та температурної динаміки контакту. ....	123
4.3 Кореляційний аналіз взаємозалежності термічних режимів, структурних трансформацій та триботехнічних характеристик поверхонь .....	136
Висновки до розділу 4. ....	139
<b>ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ.....</b>	<b>141</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>143</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>163</b>

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасний розвиток авіаційного та транспортного машинобудування характеризується постійним зростанням питомих навантажень та швидкостей ковзання у вузлах тертя. За таких умов традиційні металеві підшипники ковзання часто вичерпують свій експлуатаційний ресурс, що зумовлює гостру потребу впровадження антифрикційних полімерних композиційних систем. Полімерні композити мають унікальну здатність до самозмащування та низьку питому вагу, проте їхнє широке застосування у високонавантажених вузлах стримується складністю процесів, що відбуваються в зоні фрикційного контакту.

Однією з найбільш критичних проблем є інтенсивне тепловиділення, яке традиційно розглядається в трибології виключно як деструктивний чинник, що призводить до термомеханічного розм'якшення та передчасного руйнування полімерної матриці. Водночас сучасні наукові уявлення про термодинаміку тертя вказують на можливість реалізації процесів самоорганізації та структурної адаптації матеріалів під дією зовнішнього енергетичного впливу. Проте питання цілеспрямованого керування цими процесами та перетворення фрикційної теплоти на ресурс для зміцнення поверхонь залишається недостатньо вивченим.

Актуальність дисертаційної роботи зумовлена необхідністю розробки нових композиційних систем із прогнозованою адаптивною здатністю. Важливим аспектом є відсутність прецизійних методик супроводу триботехнічних експериментів, які б дозволяли з високою точністю верифікувати термічний стан контакту без спотворення результатів через механічне втручання. Поєднання глибокого аналізу структурної перебудови полімерів із сучасними методами інформаційно-вимірювальних технологій дозволить не лише розширити теоретичні знання про природу тертя, а й створити надійну базу для проектування високонавантажених вузлів із гарантованим ресурсом роботи.

Таким чином, розробка та дослідження триботехнічних властивостей антифрикційних композиційних систем, здатних до позитивної структурної адаптації в

умовах термічної напруженості, є актуальним науково-прикладним завданням, що має стратегічне значення для підвищення надійності сучасної техніки.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана згідно з планами науково-дослідної роботи Державного університету «Київський авіаційний інститут». Дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи №48-2022/07.06 «Підвищення ресурсу відповідальних вузлів авіаційної техніки та удосконалення технічного обслуговування повітряних суден». (Державний реєстраційний номер 0125U001081). Автором проведено порівняльний аналіз триботехнічних характеристик антифрикційних композитів на базі реактопластичної матриці та сучасних промислових термопластів (Zedex, ПС-6) при їх взаємодії зі сталевим контртілом (сталь 30ХГСА), встановлено закономірності їхньої структурної адаптації в умовах інтенсивного тепловиділення та визначено вплив процесів фрикційного зміцнення поверхневих шарів на підвищення експлуатаційного ресурсу підшипників ковзання.

**Мета роботи** полягала в підвищенні зносостійкості підшипників ковзання за рахунок обґрунтованого вибору складу антифрикційних полімерних та полімерних композиційних матеріалів та методів контролю їхнього термічного стану та триботехнічних характеристик для забезпечення керованої структурної адаптації.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувались наступні завдання:

– проаналізувати стан сучасної номенклатури полімерних матриць (РА6, РА66, РОМ, РЕТ, PS, РЕЕК та РТФЕ) і наповнювачів, обґрунтувати їхній поділ за рівнем термомеханічних властивостей та визначити умови досягнення синергетичного ефекту при створенні високонавантажених антифрикційних композитів;

– обґрунтувати вибір реактопластичних та антифрикційних термопластичних матриць для роботи у високонавантажених вузлах тертя та довести релевантність схеми випробувань «блок-на-кільці» для моделювання реальних умов експлуатації;

– розробити, класифікувати та валідувати оригінальну трибометричну установку, оснащену інтегрованими системами прецизійного моніторингу (контактною

термометрією Pt100, безконтактною пірометрією), що забезпечує комплексний аналіз взаємозв'язку між термодинамічними параметрами контакту та динамікою мікрогеометрії поверхонь

– встановити роль процесів фрикційного зміцнення у забезпеченні довговічності трибосистем та визначити кореляційний зв'язок між показником мікротвердості поверхневого шару та інтенсивністю зношування композитів;

– дослідити механізми формування вторинних антифрикційних структур (трибоплівки) та експериментально підтвердити ефект «термічного плато» для широкого спектра наповнених систем (епоксиграфітів, модифікованих поліамідів та термопластів типу Zedex), встановивши закономірності самочинної стабілізації температури внаслідок адаптивної зміни властивостей поверхонь тертя;

– обґрунтувати та верифікувати концепцію «активаційного нагріву», дослідивши умови конвертації теплової енергії тертя у ресурс зміцнення через орієнтаційну перебудову та вторинну кристалізацію макромолекул;

– визначити діапазон оптимальних швидкостей ковзання за критерієм стабільності мікрогеометрії (крива Аббота-Файерстоуна) та встановити критичні умови переходу до термічного руйнування поверхонь;

– оцінити вплив комбінованого наповнення (графітом та твердими змащувальними компонентами) на стабілізацію теплового балансу та зниження фрикційної напруженості контакту;

– розробити класифікацію антифрикційних матеріалів за їхньою адаптивною здатністю у широкому діапазоні швидкісних режимів як наукову основу для проектування композиційних підшипників нового покоління.

**Об'єкт дослідження** – процеси зношування та структурної адаптації поверхонь елементів трибоспрями на основі полімерних та полімерних композиційних матеріалів, що працюють в умовах інтенсивного фрикційного нагріву при ковзанні.

**Предмет дослідження** – закономірності структурної адаптації, кінетика термічної напруженості, градієнтний розподіл мікротвердості та інтенсивність зношування

антифрикційних полімерних та полімерних композиційних матеріалів в умовах ковзання.

**Методи дослідження.** Для дисертаційної роботи використано комплексний підхід, що поєднує методи триботехнічних випробувань, прецизійних метрологічних вимірювань та математичного аналізу. Основним методом оцінки антифрикційних властивостей обрано випробування на знос за схемою «блок-на-кільці» згідно з міжнародним стандартом ISO 7148-2, які проводились на оригінальній трибометричній установці з автоматизованою системою збору даних. Контртіло виготовлялось зі сталі 30ХГСА з контрольованою шорсткістю, а вимірювання вагового зносу зразків здійснювалось за допомогою аналітичних ваг Axis з високим класом точності.

Метрологічне забезпечення експериментів базувалось на прецизійному моніторингу термічного стану зони контакту із застосуванням платинових термоперетворювачів Pt100 за чотирипровідною схемою підключення. Математична обробка сигналів проводилась за поліноміальними рівняннями міжнародної температурної шкали ITS-90, що у поєднанні з безконтактною інфрачервоною пірометрією забезпечило верифікацію температурних градієнтів у реальному часі.

Аналіз процесів структурної адаптації та властивостей поверхонь включав лазерну скануючу профілометрію для побудови кривих Аббота-Файерстоуна та кількісної оцінки несучої здатності мікрорельєфу. Вимірювання мікротвердості приповерхневих шарів проводилось методом Віккерса на приладі ПМТ-3 для ідентифікації зон фрикційного зміцнення та аналізу градієнтного розподілу механічних властивостей по глибині доріжки тертя. Остаточне оброблення результатів та встановлення закономірностей реалізовано методами математичної статистики та кореляційного аналізу для обґрунтування концепції активаційного нагріву.

**Наукова новизна одержаних результатів визначається наступним.**

*Вперше:*

– Встановлено фундаментальну роль процесів фрикційного зміцнення полімерних та полімерних композиційних матеріалів у забезпеченні довговічності вузлів тертя, які

полягають у підвищенні зносостійкості за рахунок формування трибоплівки з підвищеною мікротвердістю, структурною орієнтацією, низьким опором зсуву в умовах ковзання.

– Встановлено, що на відміну від полімерів на основі поліамідів, які схильні до знеміцнення внаслідок механодеструкції молекулярних зв'язків, матеріали на основі термопластичних поліестерів (PET), полієфірефіркетону (PEEK) та політетрафторетилену (PTFE) забезпечують зміцнення поверхневого шару в умовах ковзання шляхом формування структурної орієнтації макромолекул і зростанням щільності фазової плівки за рахунок вторинної кристалізації під дією термомеханічного навантаження, що підвищує опірність матеріалу до зношування.

*Удосконалено:*

– теорію структурної адаптації при терті полімерних та полімерних композиційних матеріалів: встановлено кореляцію між максимальною температурою контакту та коефіцієнтом зміцнення поверхні на основі оцінки процесів інтенсивності тепловиділення, які ініціюють термомеханічне розм'якшення матриці та знижують інтенсивність зношування.

– оцінку несучої здатності поверхні полімерних та полімерних композиційних матеріалів на основі мікрогеометричних показників кривої Аббота-Файерстоуна: встановлено вплив швидкості ковзання на показник центральної частини середньої відносної опорної довжини профілю, що свідчить про формування розвиненого «плато» мікрорельєфу, яке забезпечує максимальну стабільність контакту, рівномірний розподіл питомих тисків та мінімізацію локальних напружень.

*Отримали подальший розвиток:*

– наукові уявлення про підвищення зносостійкості полімерних матеріалів шляхом введення в їх структуру компонентів, що забезпечують підвищення антифрикційних характеристик матеріалів та знижують ризик теплової деструкції їх поверхневого шару при терті.

– теорія формування зносостійких структур при терті полімерів та полімерних композиційних матеріалів: введення дисперсного графіту в епоксидну матрицю забезпечує реалізацію механізму термічної стабілізації вузла тертя формуванням графітової трибоплівки, яка проявляє високі антифрикційні властивості.

### **Практичне значення одержаних результатів:**

1. Розроблено та впроваджено методику виготовлення та термічної стабілізації високопродуктивних епоксиграфітових композитів для вузлів тертя. Запропонований підхід забезпечує високу гомогенність розподілу графіту (до 20,5% за масою) та формування стабільної тривимірної молекулярної сітки, що дозволяє замінювати промислові термопласти (РА6, РОМ, РЕЕК) у високонавантажених вузлах. Результати реалізовані у виробничу діяльність ТОВ «НД Продакшн» для створення антифрикційних матеріалів із прогнозованою мікроструктурою та підвищеною теплопровідністю (акт про реалізацію результатів наукових досліджень від 09.10.2025 року)

2. Впроваджено у навчальний процес Державного університету «Київський авіаційний інститут» (КАІ): у тематичний план лекцій, практичних та лабораторних занять з дисципліни «Технології конструкційних матеріалів» для здобувачів вищої освіти ступеня «Бакалавр» включено теоретичні та практичні питання щодо застосування сучасних полімерних композиційних матеріалів для підшипників ковзання та технологій їх виготовлення; при підготовці кваліфікаційних робіт для здобувачів ступеня «Магістр» зі спеціальності 272 «Авіаційний транспорт» використовуються розроблені технологічні заходи підвищення зносостійкості деталей авіаційних трибомеханічних систем (акт про впровадження в навчальний процес від 07.01.2026 року).

3. Розроблено та впроваджено методику оцінки протизношувальних властивостей полімерних та композиційних матеріалів, яка дозволяє визначати стійкість до деформації, кінетику зміни мікротвердості та здатність до структурної адаптації під дією термомеханічних навантажень. Методика базується на моніторингу температурних полів системою датчиків Pt100 , відповідає вимогам міжнародного стандарту ISO 7148-

2:2026 та впроваджена на ТОВ «Луцький ремонтний завод «Мотор»» для обґрунтованого вибору матеріалів підшипників ковзання (акт про реалізацію результатів наукових досліджень від 11.02.2026 року) .

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення, теоретичні та практичні результати, які виносяться на захист, одержані автором самостійно. З публікацій у співавторстві використовуються результати, отримані особисто здобувачем, а саме: проведено систематизацію та комплексний науково-технічний аналіз сучасних полімерних композиційних матеріалів, обґрунтовано вибір перспективних трибологічних пакетів для високонавантажених підшипників ковзання – [1]; розроблено конструкцію та метрологічно підтверджено характеристики експериментальної трибометричної установки з автоматизованою системою моніторингу параметрів тертя полімерів у реальному часі – [2]; запропоновано методику інтерпретації результатів трибометричних досліджень та встановлено вплив кінетики зношування на експлуатаційну надійність полімерних вузлів – [3]; досліджено функціональні параметри шорсткості мікрорельєфу поверхонь тертя полімерів за допомогою апарату кривих Аббота-Файерстоуна, що дозволило кількісно оцінити динаміку їхньої несучої здатності – [4]; встановлено закономірності зміни мікротвердості приповерхневих шарів полімерів під впливом термічної напруженості контакту та ідентифіковано зони фрикційного зміцнення – [5]; обґрунтовано механізми структурної адаптації полімерних композитів в умовах інтенсивного тепловиділення та сформульовано концепцію активаційного нагріву як чинника підвищення зносостійкості трибосистеми – [6].

**Апробація результатів дисертації.** Ключові результати та висновки проведеного дослідження пройшли апробацію шляхом їх оприлюднення на науково-практичних конференціях різних рівнів:

– XVI Міжнародній науково-практичній конференції «АВІА-2023», м. Київ, квітень 2023 року;

– XXIII Міжнародній науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Політ. Сучасні проблеми науки», м. Київ, квітень 2023 року;

- XI Всесвітньому конгресі «Авіація в ХХІ столітті» – Безпека в авіації та космічні технології, Національний авіаційний університет, м. Київ, вересень 2024 року;
- XXIV Міжнародній науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Політ. Сучасні проблеми науки», м. Київ, квітень 2024 року;
- XXV Міжнародній науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Політ. Сучасні проблеми науки», м. Київ, квітень 2025 року.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 11 наукових праць, у тому числі: 6 статей у фахових виданнях переліку МОН України (категорія Б); 5 праць апробаційного характеру.

Відповідно до п.3.6 «Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук», затвердженого Постановою КМУ № 261 (із змінами в редакції постанови КМУ від 19.05.2023 № 502) від 23.03.2016 р., та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою КМУ № 44 від 12.01.2022 р.: наукові результати дисертації висвітлені у 5 наукових публікаціях.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація містить анотації українською та англійською мовами, вступ, чотири розділи, основні результати і висновки, список використаних джерел та додатки. Список використаних джерел із 169 найменувань викладений на 20 сторінках. Обсяг додатків — 6 сторінок. Обсяг основної частини дисертації становить 121 сторінку, загальний обсяг дисертації складає 168 сторінок. Загалом у роботі міститься 21 таблиця, 25 рисунків та 2 додатки.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ

Полімерні матеріали відіграють ключову роль у сучасному машинобудуванні, зокрема у виробництві підшипників ковзання, зубчастих передач та ущільнювальних елементів, що забезпечують ефективну та довговічну роботу вузлів тертя в різних галузях промисловості, авіації, транспорту та енергетики. Вибір полімеру для таких застосувань визначається комплексом фізико-механічних, триботехнічних, хімічних та технологічних властивостей, а також можливістю модифікації за допомогою наповнювачів.

У цьому огляді розглянуто основні класи полімерних матеріалів, що застосовуються для підшипників ковзання та інших вузлів тертя: поліаміди (РА6, РА66), поліацетали (РОМ), полістирол (PS), поліетилентерефталат (РЕТ), поліефірефіркетон (РЕЕК), фторопласти (РТФЕ) та їх композити. Для кожного матеріалу наведено фізико-механічні властивості, триботехнічні характеристики, переваги та недоліки, типові наповнювачі та приклади промислового використання, а також вплив експлуатаційних факторів і сучасні методи модифікації поверхні.

Особливу увагу приділено полімерним композитам триботехнічного призначення, ефективність яких визначається не лише властивостями матриці, а й типом, морфологією та концентрацією наповнювачів. Серед найбільш поширених модифікаторів виділяють армуючі волокна (вуглецеві, скляні), тверді мастила (графіт, дисульфід молібдену, РТФЕ як наповнювач) та наночастинки ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , вуглецеві нанотрубки). Їхній вплив на коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування є комплексним і реалізується через різні механізми: формування плівки перенесення, зміцнення міжфазного шару, підвищення теплопровідності та синергію між різними типами наповнювачів.

Метою цього розділу є систематизація сучасних наукових даних щодо полімерних матриць і наповнювачів, аналіз їхнього впливу на трибологічні властивості композитів, а також наведення прикладів синергії у трибологічних пакетах для різних полімерних систем. Огляд базується на результатах досліджень останнього десятиліття, опублікованих у провідних журналах (Wear, Tribology International, Materials & Design), а також на стандартах випробувань (ISO 7148-2) та сучасних аналітичних моделях зносостійкості.

## **1.1 Полімерні матриці для трибологічних композитів**

### **1.1.1 Поліаміди (РА6, РА66): базові інженерні термопласти для вузлів тертя.**

Поліаміди (РА) належать до групи напівкристалічних термопластичних полімерів, що характеризуються високою міцністю, жорсткістю та термостійкістю. Найбільш поширеними представниками є поліамід-6 (РА6, полікапролактан) та поліамід-66 (РА66) [1]. Їхні властивості визначаються структурою макромолекул та рівнем кристалічності, який може досягати 60%. РА6 вирізняється підвищеною ударною в'язкістю, особливо у вологому стані, та кращою пластичністю, тоді як РА66 має вищу жорсткість, міцність і термостійкість, але поступається РА6 за ударною в'язкістю. Обидва матеріали є гігроскопічними: поглинання води призводить до зниження жорсткості та розмірної стабільності, проте водночас підвищує пластичність і ударну в'язкість [2].

Трибологічні характеристики поліамідів визначаються як їхньою природною структурою, так і можливістю модифікації. Коефіцієнт тертя у сухих та змащених умовах зазвичай становить 0.30–0.40 [3]. Введення дисперсних та волокнистих наповнювачів, таких як скловолокно (GF), вуглецеве волокно (CF), дисульфід молібдену ( $\text{MoS}_2$ ) чи політетрафторетилен (PTFE), дозволяє знизити коефіцієнт тертя до 0.15–0.30 та суттєво підвищити опір абразивному й адгезійному зносу [4].

Ефективність модифікації поліамідів визначається не лише видом наповнювача, але й його концентрацією та рівномірністю розподілу у матриці, що безпосередньо впливає

на стабільність трибологічних характеристик. Крім того, комбіноване використання волокнистих і дисперсних добавок забезпечує синергетичний ефект, який проявляється у зниженні інтенсивності зношування та підвищенні довговічності матеріалу.

Таблиця 1.1

### Фізико-механічні властивості поліамідів PA6 та PA66

Властивість	PA6	PA66
Щільність, г/см <sup>3</sup>	1,13	1,12–1,16
Міцність на розтяг, МПа	70–80	80–100
Модуль Юнга, ГПа	2,6–3,0	2,8–3,2 (типово)
Температура плавлення, °С	220–223	255–265
Робоча температура, °С	до 100	120–180 (короткочасно до 200)
Водопоглинання, % (RH=100%)	до 9	до 8
Відносне подовження, %	40–80	20–60
Твердість, Shore D	75–80	80–85

Важливим фактором є вплив вологи, яка спричиняє ефект пластифікації: молекули води вбудовуються у міжланцюговий простір та послаблюють водневі зв'язки [5]. Це призводить до зниження модуля пружності та границі міцності, але водночас підвищує ударну в'язкість і пластичність [6]. Експлуатація поліамідних матеріалів у середовищі з високою вологістю та температурою значно прискорює термоокислювальне старіння, яке є формою гідротермічної деградації та викликає незворотне руйнування полімерного ланцюга. Згідно з дослідженнями, саме термоокислювальне старіння є однією з головних причин обмеження довговічності поліамідів та критичного зниження їхньої експлуатаційної придатності у довгостроковій перспективі [7].

У цілому PA6 та PA66 поєднують комплекс позитивних властивостей: високу міцність, жорсткість, ударну в'язкість і зносостійкість. Важливою перевагою є можливість їх модифікації різними наповнювачами, що дозволяє оптимізувати

властивості при збереженні економічної ефективності. Водночас поліаміди мають певні обмеження: значну гігроскопічність (особливо PA66), зниження розмірної стабільності при контакті з вологою, схильність до термоокислювального старіння та нижчу термостійкість порівняно з високотемпературними полімерними системами, такими як РЕЕК. З огляду на високу схильність поліамідів до гідролітичної деградації при підвищених температурах і вологості, для забезпечення прогнозованої довговічності та стабільності механічних характеристик рекомендовано введення термо- та гідростабілізаторів (антиоксидантів) до складу полімерної матриці [8].

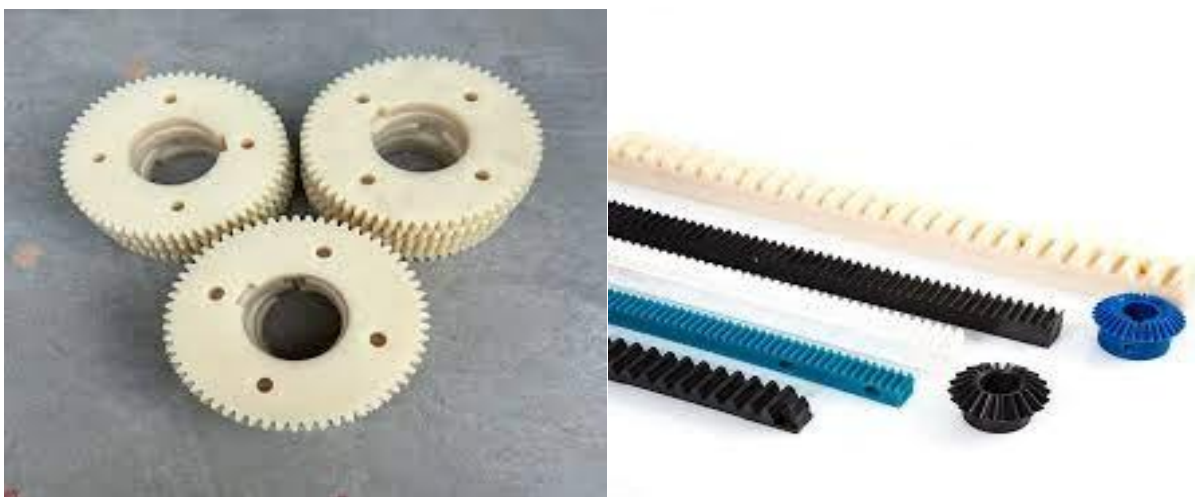


Рис 1.1. Полімерні шестерні та рейки, які використовуються у вузлах тертя.

Поліаміди є одними з найбільш поширених конструкційних полімерів, що застосовуються у різних галузях промисловості — від автомобілебудування та машинобудування до побутової техніки й електротехніки. Особливе місце серед напрямів їх використання займає виготовлення підшипників ковзання, де поєднання високої зносостійкості, достатньої міцності та низького коефіцієнта тертя забезпечує ефективну роботу вузлів тертя без значних витрат мастильних матеріалів [9]. Саме ця властивість робить поліаміди конкурентоспроможними у трибологічних застосуваннях, де важливими є довговічність та стабільність експлуатаційних характеристик [10]. Крім того, поліаміди широко використовуються для виробництва втулок, шестерень, елементів підвісок і педаль в автомобільній промисловості, деталей насосів,

сепараторів підшипників та напрямних у машинобудуванні, а також у побутових приладах і електротехнічних виробках (ізолятори, корпуси).

### 1.1.2 Полістирол (PS): економічний матеріал з обмеженою зносостійкістю.

Полістирол (PS) є аморфним термопластичним полімером, який характеризується високою жорсткістю, низькою ударною міцністю та обмеженою зносостійкістю [11]. Завдяки простоті переробки та низькій вартості він широко використовується у виробництві побутових і технічних виробів, зокрема корпусів, упаковки та елементів, що не зазнають значних механічних навантажень. Його аморфна структура забезпечує легкість формування виробів методом лиття під тиском та екструзії, а також мінімальну усадку, що є важливим фактором для виготовлення деталей із високою точністю [12]. Водночас механічні та триботехнічні властивості полістиролу обмежують його застосування у вузлах з підвищеним навантаженням, особливо без модифікації наповнювачами. Як зазначається у дослідженнях експлуатація немодифікованого PS у вузлах тертя є проблематичною через високий коефіцієнт тертя та низьку зносостійкість при контакті зі сталевим контр-тілом [13].

Таблиця 1.2

#### Фізико-механічні властивості полістиролу (PS)

Властивість	Значення
Щільність, г/см <sup>3</sup>	1,04–1,06
Міцність на розтяг, МПа	35–55
Модуль Юнга, ГПа	3,0–3,5
Температура плавлення, °C	240–250
Робоча температура, °C	до 70–90 (короткочасно до 100)
Водопоглинання, % (RH=100%)	0,03–0,1
Відносне подовження, %	1–3
Твердість, Shore D	75–80

У чистому вигляді матеріал демонструє високий коефіцієнт тертя та критично низьку довговічність у трибологічних системах [14]. Експериментально встановлено, що введення вуглецевих наповнювачів дозволяє суттєво модифікувати поверхневі властивості полімеру [15]. Зокрема, дослідження композитів із вмістом графіту в діапазоні 10–30 мас.% показало значне зниження коефіцієнта тертя та підвищення граничного значення PV-фактора [16]. Окрім цього, графіт сприяє формуванню захисної плівки на поверхні тертя та підвищує теплопровідність композиту, що забезпечує ефективне відведення тепла із зони контакту та зниження температурного напруження.



Рис 1.2. Армований скловолокном полістирол (PS)

Широке застосування полістиролу у промисловості пояснюється його технологічними та економічними перевагами. До ключових позитивних факторів належать низька собівартість сировини та висока технологічність переробки, що забезпечується аморфною структурою полімеру [17]. Крім того, PS демонструє високу сприйнятливості до модифікації, що дозволяє варіювати його властивості шляхом введення функціональних наповнювачів.

Аналіз сучасних досліджень дозволяє виділити основні групи наповнювачів, що застосовуються для адаптації властивостей PS до умов експлуатації. Для зниження коефіцієнта тертя та підвищення зносостійкості ефективним є введення матеріалів із шаруватою або низькоенергетичною структурою [19]. Політетрафторетилен (PTFE) та дисульфід молібдену ( $\text{MoS}_2$ ) використовуються як високоефективні тверді мастила, що забезпечують стабільність антифрикційних властивостей навіть при високих питомих навантаженнях [20].

Для підвищення експлуатаційних характеристик полімерних систем застосовуються армуючі наповнювачі, основним завданням яких є компенсація крихкості матриці та збільшення її несучої здатності. Волокнисті матеріали, зокрема скловолокно [GF] та вуглецеве волокно [CF], формують жорсткий внутрішній каркас, що сприймає значну частину механічного навантаження [21]. Така структура сприяє істотному зростанню модуля пружності та міцності на розрив, а також може виконувати функцію додаткового твердого мастила, забезпечуючи механічну стабільність зони тертя.

Дисперсні мінеральні наповнювачі, зокрема діоксид кремнію ( $\text{SiO}_2$ ), широко застосовуються для модифікації полімерних композитів [22]. Введення дисперсних частинок  $\text{SiO}_2$  сприяє підвищенню жорсткості, твердості та розмірної стабільності виробів, одночасно зменшуючи температурну усадку та повзучість матеріалу. Використання наночастинок SiO як активного наповнювача дозволяє оптимізувати міжфазну взаємодію в полімерній матриці завдяки їхній значній питомій поверхні та здатності до функціоналізації, що є ключовим чинником покращення експлуатаційного ресурсу композитів

Дослідження показують, що при підвищених температурах та механічних навантаженнях інтенсивність зношування чистого PS значно зростає [23]. Водночас введення мастильних добавок (наприклад, восків або PTFE) дозволяє суттєво знизити коефіцієнт тертя та підвищити довговічність. Використання наповнювачів, таких як дисульфід молібдену чи вуглецеві волокна, також сприяє покращенню трибологічних

характеристик, забезпечуючи більш стабільну роботу матеріалу у контакті з металевими поверхнями [24].

Таким чином, перспективність полістиролу у трибологічних застосуваннях визначається переважно його модифікацією та створенням композитних систем, що дозволяють компенсувати природні обмеження базового полімеру. У чистому вигляді PS має обмежену придатність для вузлів тертя, проте завдяки широкому спектру можливих наповнювачів він може бути адаптований до умов експлуатації, забезпечуючи баланс між економічною ефективністю та функціональністю.

### **1.1.3 Поліетилентерефталат (PET): баланс міцності та термостійкості.**

Поліетилентерефталат (PET) є одним із найбільш поширених термопластичних полімерів, що вирізняється високою конкурентоспроможністю завдяки поєднанню ряду ключових властивостей [25]. Матеріал характеризується значною міцністю на розрив та жорсткістю, що забезпечує його надійність як конструкційного матеріалу [26]. Важливим фактором є також бар'єрні характеристики: PET демонструє добру газо- та паронепроникність, що робить його незамінним у пакувальній промисловості для збереження якості та безпечності продуктів. Окрім цього, полімер має низьке водопоглинання та стійкість до більшості органічних розчинників (за винятком сильних лугів та кислот), що визначає його довговічність та стабільність у різних умовах експлуатації [27].

Завдяки збалансованому комплексу властивостей PET знайшов широке застосування не лише у виробництві волокон та тари, а й у машинобудуванні та електротехнічній галузі. Висока розмірна стабільність, хімічна стійкість та низьке водопоглинання мінімізують деградацію властивостей під дією агресивних середовищ та вологи. Додатковою перевагою є можливість переробки та повторного використання, що відповідає принципам сталої інженерії [28]. Поєднання високої механічної міцності з добрими діелектричними властивостями робить PET придатним для використання у деталях електроізоляційного та конструкційного призначення. Крім того, стабільність

властивостей у широкому діапазоні температур забезпечує його конкурентоспроможність серед інженерних термопластів.

Таблиця 1.3

**Фізико-механічні властивості поліетилентерефталату (PET)**

Показник	Значення
Щільність, г/см <sup>3</sup>	1,34–1,40
Міцність на розтяг, МПа	55–75
Модуль Юнга, ГПа	2,5–2,8
Температура плавлення, °C	250–260
Робоча температура, °C	до 120 °C (короткочасно до 150 °C)
Водопоглинання, % (RH=100%)	<0,5
Відносне подовження, %	30–60
Твердість, Shore D	80–85

Разом із тим, використання чистого PET у високотехнологічних системах обмежується низкою критичних експлуатаційних недоліків [29]. Основними лімітуючими факторами є високий коефіцієнт тертя та низька зносостійкість, які унеможливають його ефективну експлуатацію у вузлах ковзання без додаткової модифікації [30, 31]. Крім того, матеріал схильний до крихкого руйнування при ударних навантаженнях та має обмежену робочу температуру порівняно з високотемпературними полімерними системами, такими як PEEK [32]. Це зумовлює необхідність застосування армуючих та антифрикційних наповнювачів.

Напівкристалічна структура PET забезпечує його високу міцність та жорсткість, що дозволяє активно використовувати матеріал як конструкційний у машинобудуванні для виготовлення втулок, шестерень та напрямних [33]. Висока хімічна стійкість до агресивних рідин та розмірна стабільність роблять його незамінним в автомобільній

промисловості (деталі систем охолодження та елементи трансмісії), а також в електротехніці, де PET застосовується для створення корпусів, ізоляторів та елементів з'єднань. У цих сегментах особливо цінуються низьке водопоглинання та висока електрична ізоляційна здатність полімеру.

Завдяки винятковим бар'єрним властивостям та прозорості PET домінує у пакувальній промисловості, де він використовується для масового виробництва пляшок, плівок та контейнерів [34]. Окремо варто відзначити застосування PET у медицині, де він використовується для виробництва мембран та стерилізованих елементів [35]. Тут критично важливою є здатність матеріалу зберігати свої механічні й трибологічні властивості навіть після необхідної обробки [36].

#### **1.1.4 Полієфірефіркетон (PEEK): високопродуктивна матриця для критичних режимів.**

Полієфірефіркетон (PEEK) належить до сімейства поліарилефіркетонів (PAEK) і є високопродуктивним напівкристалічним термопластичним полімером, чия хімічна структура визначає унікальне поєднання експлуатаційних властивостей. Макромолекула PEEK складається з повторюваних ланок, з'єднаних ефірними ( $-O-$ ) та кетонними ( $-CO-$ ) групами, інтегрованими в ароматичні кільця, що забезпечує виняткову термічну та хімічну стабільність матеріалу [37]. Завдяки цьому PEEK вирізняється серед інших конструкційних полімерів високої продуктивності та демонструє виняткову трибологічну витривалість.

У немодифікованому стані при сухому терті по сталі коефіцієнт тертя становить 0.3–0.4, що є відносно високим для антифрикційних полімерів, однак матеріал зберігає стабільність цього показника навіть при підвищенні температури в зоні контакту. Така поведінка пояснюється високою температурою склування ( $T_g \approx 143\text{ }^\circ\text{C}$ ) та температурою плавлення, які забезпечують термічну інертність полімерної матриці [38]. Висока власна зносостійкість PEEK зумовлена значною механічною міцністю та в'язкістю руйнування, що забезпечують ефективний опір абразивному та адгезійному зношуванню. Жорсткість

макромолекул зменшує схильність до мікрорізання нерівностями контртіла, а термічна стабільність запобігає схопленню поверхонь при високих швидкостях ковзання [39].

Таблиця 1.4

**Фізико-механічні властивості поліефірефіркетону (PEEK) [40].**

Властивість	Значення
Щільність, г/см <sup>3</sup>	1,30–1,32
Міцність на розтяг, МПа	90–100
Модуль Юнга, ГПа	3,6–4,0
Температура плавлення, °С	~ 343
Робоча температура, °С	до 250–260 °С (тривале використання)
Водопоглинання, % (RH=100%)	<0,05
Відносне подовження, %	20–50 %
Твердість, Shore D	85–95

Для використання у високонавантажених вузлах тертя, таких як підшипники ковзання, втулки чи високомоментні шестерні, PEEK часто модифікують [41]. Армування вуглецевими волокнами підвищує несучу здатність, жорсткість і теплопровідність композиту, зменшуючи локальні температурні піки у зоні контакту. Додавання твердих мастильних наповнювачів, таких як PTFE, графіт або MoS<sub>2</sub>, сприяє формуванню стабільної плівки перенесення, яка знижує коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування. Поєднання вуглецевих волокон із твердими мастильними добавками забезпечує синергетичний ефект: коефіцієнт тертя може зменшуватися до 0.1–0.15, а інтенсивність зношування — на кілька порядків [42]. Таким чином, комплексна модифікація PEEK за рахунок введення дисперсних наповнювачів та термічної стабілізації забезпечує формування гетерогенних структур із прогнозованим триботехнічним ресурсом, що обумовлено підвищенням опору матеріалу до втомного

зношування та термічної деградації у зоні фактичного контакту при експлуатації у найжорсткіших режимах динамічного навантаження.



Рис 1.4. Приклади прецизійних елементів машинобудування, виготовлених із поліефірефіркетону (PEEK)

Унікальне положення PEEK серед конструкційних полімерів визначається поєднанням високої термостійкості, хімічної інертності та трибологічної витривалості, однак його широке промислове впровадження стримується економічними та технологічними чинниками [43]. Матеріал здатен витримувати тривалу експлуатацію при температурах до 250–260 °С без суттєвої деградації механічних властивостей, що у поєднанні зі стійкістю до гідролізу та органічних розчинників дозволяє використовувати його у середовищі перегрітої пари, мастил та агресивних хімічних агентів [44]. Низьке водопоглинання (0.05%) та низький коефіцієнт теплового розширення забезпечують високу розмірну стабільність прецизійних деталей у змінних кліматичних умовах. Важливою перевагою є також біосумісність та біоінертність PEEK: завдяки модулю пружності, близькому до кортикальної кістки, він широко застосовується у виробництві медичних імплантатів, зокрема міжхребцевих кейджів, забезпечуючи радіопрозорість та відсутність відторгнення тканин [45].

Разом із тим, застосування РЕЕК у трибологічних системах має певні обмеження. Висока вартість сировини, пов'язана зі складністю синтезу мономерів, робить його економічно доцільним лише у відповідальних вузлах, де дешевші матеріали не забезпечують необхідної надійності [46]. У чистому вигляді РЕЕК має відносно високий коефіцієнт тертя, що може спричиняти перегрів зони контакту, тому для роботи у вузлах ковзання він потребує модифікації антифрикційними добавками. Крім того, висока температура плавлення (343 °С) вимагає застосування спеціалізованого обладнання, здатного підтримувати температуру переробки 380–400 °С, а також точного контролю режимів охолодження для забезпечення необхідного ступеня кристалічності [47].

Поєднання високої термостійкості, хімічної інертності та трибологічної витривалості зумовило широке використання РЕЕК у високотехнологічних секторах промисловості, де він ефективно заміщує метали, зокрема алюміній, титан і сталь [48]. У машинобудуванні РЕЕК застосовується для виготовлення підшипників ковзання, втулок, клапанів та високомоментних шестерень, здатних працювати без змащування або в умовах масляного голодування. У транспортній галузі матеріал використовується для заміни металевих деталей двигунів, компресорів і паливних насосів, забезпечуючи зниження маси вузлів до 70% порівняно з металами. Висока діелектрична міцність та термостійкість роблять РЕЕК придатним для виробництва ізоляційних компонентів, конекторів і підкладок мікросхем, що витримують високотемпературне паяння.

### **1.1.5 Політетрафторетилен (PTFE): самозмащувальний полімер із винятковою хімістійкістю.**

Політетрафторетилен (PTFE), відомий у техніці як фторопласт-4, є лінійним високомолекулярним кристалічним полімером із повторюваними ланками  $-\text{CF}_2-\text{CF}_2-$ . Його унікальні властивості визначаються природою хімічного зв'язку вуглець-фтор (C–F), енергія якого є однією з найвищих в органічній хімії ( $\approx 485$  кДж/моль). Атоми фтору формують навколо вуглецевого скелета щільну електронегативну оболонку, що

забезпечує просторову стабілізацію макромолекул і визначає виняткову хімічну та термічну інертність матеріалу [49].

Таблиця 1.5

**Фізико-механічні властивості політетрафторетилену (PTFE) [50].**

Властивість	Значення
Щільність, г/см <sup>3</sup>	2,13–2,23
Міцність на розтяг, МПа	20–35
Модуль Юнга, ГПа	0,4–1,5
Температура плавлення, °С	325–335
Робоча температура, °С	–200...+260
Водопоглинання, % (RH=100%)	<0,01
Відносне подовження, %	200–400
Твердість, Shore D	50–60

PTFE практично не реагує з концентрованими кислотами, лугами та більшістю органічних розчинників, а його стійкість порушується лише при контакті з розплавами лужних металів, елементарним фтором за високих температур або трифторидом хлору [51]. Матеріал демонструє надзвичайно високу термічну стабільність, зберігаючи працездатність у діапазоні від криогенних температур до +260 °С. Температура плавлення кристалічних областей становить близько 327 °С, однак навіть при її перевищенні він не переходить у в'язкотекучий стан, а утворює прозорий гель, що визначає специфіку його переробки — спікання замість плавлення [52].

Однією з ключових характеристик PTFE є його трибологічні властивості. Матеріал має один із найнижчих коефіцієнтів тертя серед твердих тіл (0.01–0.10), що пояснюється слабкими міжмолекулярними взаємодіями між ланцюгами полімеру. Це забезпечує ефект «самозмащування» та стабільність роботи у вузлах ковзання [53]. Крім того, PTFE

характеризується антиадгезійністю гідро- та олеофобністю, а також стабільними діелектричними параметрами, що практично не змінюються в широкому діапазоні частот і температур. Матеріал є біологічно інертним, що дозволяє його застосування у медичних виробках та імплантах [54].

Механічні властивості PTFE демонструють виражену температурну залежність. При наближенні до температури склування ( $T_g \approx 130^\circ\text{C}$ ) зростає рухливість макромолекулярних ланцюгів, що призводить до зниження жорсткості та міцності. Модуль Юнга зменшується від 0,52 ГПа при  $23^\circ\text{C}$  до 0,25 ГПа при  $200^\circ\text{C}$ , а границя текучості — з 14,2 МПа до 5,1 МПа [55, 56]. Це визначає особливості застосування матеріалу в умовах підвищених температур.

Типові значення коефіцієнта тертя PTFE у парі «полімер-сталь» становлять 0,04–0,10 для статичного та 0,01–0,10 для динамічного тертя [57]. Встановлено, що зі зростанням навантаження коефіцієнт тертя зменшується та стабілізується при навантаженнях понад  $\approx 0,8$  МПа. При екстремальних умовах експлуатації він може досягати мінімальних значень  $< 0,01$ . Важливою перевагою є стабільність антифрикційних властивостей у діапазоні температур до точки плавлення ( $\approx 327^\circ\text{C}$ ), тоді як перевищення цієї межі призводить до різкого зростання тертя та деградації матеріалу [58, 59]. Механізм низького тертя пов'язаний із формуванням тонкої трансферної плівки на контртілі, що мінімізує прямий контакт поверхонь [60].

Завдяки поєднанню низького коефіцієнта тертя, самозмащуваності, хімічної інертності та високої термостійкості PTFE широко застосовується у промислових вузлах тертя. Найбільш поширеними є металофторопластові підшипники ковзання, які складаються зі сталеві основи, пористого бронзового шару та поверхневого шару PTFE, інколи модифікованого графітом,  $\text{MoS}_2$  або скловолокном. Така конструкція забезпечує високу несучу здатність, низький коефіцієнт тертя (0,04–0,08), стабільну роботу в діапазоні від  $-200$  до  $+280^\circ\text{C}$  та стійкість до агресивних середовищ [61].

Завдяки такій комбінації властивостей металофторопластові системи розглядаються як універсальний стандарт для довготривалої роботи у складних експлуатаційних умовах



Рис 1.5. Типові конструкції металополімерних підшипників ковзання з антифрикційним шаром на основі PTFE

Поєднання виняткової хімічної інертності, термічної стабільності та вираженої гідрофобності зумовлює широке використання PTFE у виробництві герметизуючих елементів для хімічної, фармацевтичної та харчової промисловості [62]. Ущільнювальні компоненти та прокладки на основі даного полімеру забезпечують надійну ізоляцію у фланцевих з'єднаннях, клапанних механізмах, реакторах та трубопровідних системах. Такі деталі характеризуються тривалим експлуатаційним ресурсом, стійкістю до кліматичного старіння та, що є критично важливим, відсутністю ризику забруднення технологічних середовищ продуктами деградації матеріале.

Окрім герметизації, PTFE та антифрикційні композити на його основі інтегруються у навантажені вузли тертя, зокрема втулки, напрямні, шарнірні з'єднання та компоненти гідроциліндрів. Завдяки наднизькому коефіцієнту тертя, матеріал

дозволяє реалізувати автономний режим роботи без додаткового мастила, що сприяє демпфуванню вібрацій, зниженню рівня шуму та суттєвому підвищенню довговічності механізмів. Високий ступінь чистоти та біологічна інертність роблять втулки з PTFE незамінними для обладнання харчового, текстильного та медико-хімічного спрямування [63, 64].

### **1.1.6 Поліацеталь (POM): конструкційний полімер із низьким коефіцієнтом тертя.**

Поліацеталь, відомий також як поліоксиметилен (POM), ацеталь або поліформальдегід, є високомолекулярним термопластичним полімером, що утворюється в результаті полімеризації формальдегіду. Його структура являє собою лінійний ланцюг із повторюваними оксиметиленовими ланками  $(-\text{CH}_2-\text{O}-)_n$ , які забезпечують високий рівень кристалічності та міцності [65, 66]. Завдяки такій будові поліацеталь характеризується значною жорсткістю, високою міцністю, низьким коефіцієнтом тертя та чудовою зносостійкістю, що робить його одним із найбільш придатних полімерів для використання у вузлах тертя.

POM належить до класу напівкристалічних полімерів, рівень кристалічності яких може досягати 60–80% для кополімеру та 70–100% для гомополімеру [67]. Висока кристалічність визначає не лише механічні, а й трибологічні властивості матеріалу, забезпечуючи стабільність розмірів, низьке водопоглинання та стійкість до хімічних впливів.

Існує два основних типи поліацеталю — гомополімер (POM-H) та кополімер (POM-C). Гомополімер отримують шляхом аніонної полімеризації формальдегіду; він характеризується вищою кристалічністю, жорсткістю, міцністю на розтяг та більш високою температурою плавлення (172–184 °C), але є більш чутливим до гідролізу [68].

Кополімер синтезується катіонною полімеризацією триоксану з додаванням сомономерів, що знижує рівень кристалічності до 60–80%, проте підвищує термічну та хімічну стабільність, стійкість до гідролізу та ударну в'язкість [69, 70]. Температура плавлення кополімеру становить 160–175 °C, що дещо нижче порівняно з

гомополімером, проте він легше піддається обробці та має кращу експлуатаційну стабільність [71].

Таким чином, POM-H вирізняється вищою міцністю, жорсткістю та температурою плавлення, але поступається POM-C за стійкістю до гідролізу. Кополімер демонструє кращу хімічну та термічну стабільність, вищу ударну в'язкість і легшу оброблюваність, що робить його більш універсальним для промислового застосування. Кристалічні області забезпечують матеріалу жорсткість і міцність, а аморфні — пластичність та ударну в'язкість. Вища кристалічність підвищує зносостійкість і стабільність розмірів, але водночас знижує ударну в'язкість [72].

Поліоксиметилен належить до конструкційних термопластів, які поєднують високу міцність із низькою масою, що робить його ефективною альтернативою металам у багатьох вузлах тертя [73]. Щільність матеріалу становить 1.39–1.43 г/см<sup>3</sup>, міцність на розтяг для гомополімеру сягає 70–75 МПа, а для кополімеру — 60–70 МПа. Модуль Юнга перебуває у межах 2.5–3.2 ГПа, що забезпечує високу стабільність розмірів та низьку деформацію під навантаженням. Робочий діапазон температур охоплює інтервал від –50 °С до +100...+120 °С, а короткочасно матеріал витримує до 140 °С [74, 75]. Водопоглинання є надзвичайно низьким (<0.25 %), що гарантує стабільність розмірів навіть у вологому середовищі. Відносне подовження при розриві варіює у межах 10–75%, а твердість за Shore D становить 80–90 [76].

Трибологічні властивості POM визначають його як один із найкращих полімерів для вузлів ковзання. При сухому терті по сталі статичний коефіцієнт становить 0.15–0.35, а динамічний — 0.04–0.20 [77]. При використанні мастильних матеріалів коефіцієнт тертя може знижуватися до 0.05–0.15. Для пари POM–POM зафіксовано значення 0.314 (сухе) та 0.280 (змащене) для статичного тертя, і 0.040 та 0.139 відповідно для динамічного [78]. Важливим чинником є матеріал контртіла: при терті по сталі коефіцієнт тертя залишається стабільно низьким, тоді як при взаємодії з полімерними матеріалами, наприклад PTFE, він може зростати до 0.3–0.5 [79]. Важливою особливістю є також стабільність трибологічних характеристик у широкому діапазоні температур, що

робить POM придатним для використання у вузлах із змінними режимами навантаження. Крім того, поєднання низького коефіцієнта тертя та високої зносостійкості забезпечує його конкурентоспроможність серед інженерних полімерів для довготривалої експлуатації.

Таблиця 1.6

**Фізико-механічні властивості поліацеталю (POM) [80]**

Властивість	POM-H (гомополімер)	POM-C (кополімер)
Щільність, г/см <sup>3</sup>	1.41–1.43	1.39–1.42
Міцність на розтяг, МПа	65–75	60–70
Модуль Юнга, ГПа	2.8–3.2	2.5–3.0
Температура плавлення, °C	172–184	160–175
Робоча температура, °C	-50...+100	-50...+100
Водопоглинання, % (RH=100%)	0.20–0.25	0.20–0.25
Відносне подовження, %	15–35	20–60
Твердість, Shore D	80–90	80–85

Висока зносостійкість є ще однією визначальною характеристикою POM, особливо у парі з металевими контртілами. Додавання наповнювачів, таких як PTFE, дисульфід молібдену чи графіт, додатково знижує інтенсивність зношування [81]. За даними довготривалих випробувань, використання композитів на основі POM із PTFE або мікрокапсулами мастила дозволяє зменшити знос на 69–88% порівняно з чистим полімером [82]. Граничні умови роботи вузлів ковзання визначаються PV-лімітом: для POM він становить 0.32–0.5 МПа·м/с при безперервній роботі без змащення та до 4–5 МПа·м/с для короточасних навантажень або при використанні мастильних матеріалів [83]. При PV=5 МПа·м/с чистий POM демонструє нестабільний режим тертя, тоді як

композити з волокнами або PTFE забезпечують стабільний коефіцієнт тертя та знижений рівень зношування [84].

Важливим чинником, що впливає на трибологічні властивості POM, є вологість та температура [85]. Низьке водопоглинання (<0.25%) забезпечує стабільність розмірів і практично незмінні трибологічні характеристики навіть при відносній вологості 100%. Водночас підвищення температури понад 100 °C призводить до зниження міцності, зростання повзучості та інтенсифікації процесів зношування [86]. При температурах понад 140 °C можливе термічне руйнування полімеру. Введення наповнювачів, таких як скловолокно чи мінеральні добавки, дозволяє підвищити термостійкість матеріалу на 10–15 °C, що розширює діапазон його практичного застосування [87].

Поліоксиметилен (POM) демонструє високу зносостійкість при контакті з металевими поверхнями, особливо у випадку модифікації PTFE, дисульфідом молібдену чи мікрокапсулами мастила. Низький коефіцієнт тертя (0.10–0.35) забезпечує ефект самозмашування та сприяє зниженню енергоспоживання [88]. Матеріал здатний стабільно працювати при тривалому терті (до 168 годин або понад 150 км пробігу), що особливо характерно для композитів із PTFE чи мастильними добавками [89]. Висока жорсткість і міцність дозволяють використовувати його у відповідальних конструкційних елементах, а низьке водопоглинання забезпечує стабільність розмірів навіть у вологому середовищі. POM характеризується високою розмірною стабільністю та стійкістю до повзучості, позитивною хімічною стійкістю до впливу масел, палив, розчинників, слабких кислот і лугів, а також високими електроізоляційними властивостями, що відкриває можливості його застосування в електротехніці. Важливою перевагою є також легка оброблюваність — матеріал добре піддається інжекційному литтю та механічній обробці, що дозволяє виготовляти складні деталі з високою точністю до 0.01 мм [90].

Разом із тим POM має низку обмежень, які необхідно враховувати при його використанні. Робоча теплостійкість обмежена діапазоном 100–120 °C, а при температурах понад 140 °C відбувається деградація полімеру. Гомополімер (POM-H) є

чутливим до гідролізу при тривалому впливі гарячої води або пари. Матеріал також характеризується чутливістю до надрізів, що може призводити до крихкого руйнування при наявності дефектів. Введення деяких наповнювачів, таких як SiC чи Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, може знижувати механічні властивості [91]. При контакті з м'якими полімерними контртілами (наприклад, UHMWPE) без модифікацій POM демонструє підвищений знос і коефіцієнт тертя. Крім того, матеріал є горючим, що потребує застосування антипіренів для підвищення його вогнестійкості [92].

Складність склеювання та фарбування зумовлена низькою адгезією до більшості клеїв і фарб, а обмежена стійкість до ультрафіолетового випромінювання вимагає використання стабілізаторів при зовнішньому застосуванні.



Рис 1.6. Підшипники ковзання з поліформальдегідного матеріалу (POM): типова геометрія та серійне виконання.

Завдяки поєднанню високого ступеня кристалічності та природних самозмашувальних властивостей POM зайняв нішу пріоритетного конструкційного матеріалу для виготовлення прецизійних механічних вузлів. Його низький коефіцієнт

тертя, висока твердість поверхні та виняткова втомна міцність визначають техніко-економічну доцільність використання цього полімеру у трибосистемах, що працюють в умовах циклічних навантажень та вимагають довготривалої стабільності розмірів [93]. Основною сферою застосування є вузли ковзання, де він виступає ефективною альтернативою металам та поліамідам. POM широко використовується для виробництва підшипників ковзання, втулок, сепараторів підшипників кочення та напрямних елементів. Ключовою перевагою у цих застосуваннях є низьке водопоглинання, що дозволяє експлуатувати деталі у вологому середовищі з мінімальними допусками без ризику гігроскопічної деградації, яка є критичним недоліком поліамідів (РА6, РА66) [94].

Окрім підшипникових вузлів, поліацеталь є стандартом для виготовлення навантажених елементів передавальних механізмів, зокрема дрібномодульних зубчастих коліс, кулачків та деталей ланцюгових конвеєрів. У цих вузлах критично важливою є висока пружність матеріалу (ефект «повернення форми»), що забезпечує стійкість до втомного зношування та ударних навантажень при зачепленні. Для екстремальних умов експлуатації застосовуються модифіковані марки POM із додаванням PTFE або силіконового мастила, що дозволяє додатково знизити коефіцієнт тертя та тепловиділення у зоні контакту [95].

Систематизація фізико-механічних та теплофізичних параметрів полімерних матриць дозволяє узагальнити їхні ключові експлуатаційні характеристики та визначити межі застосування у трибологічних композитах. Представлені дані (таб.1.7) відображають діапазони щільності, міцності, модулів пружності, температурних режимів та інших показників, що формують основу для подальшого обґрунтування вибору матеріалів. Узагальнені характеристики створюють цілісне уявлення про потенціал базових полімерів, окреслюють їхню роль у забезпеченні надійності та довговічності вузлів тертя та підкреслюють відмінності між інженерними термопластами загального призначення й високопродуктивними системами для

критичних режимів. Такий підхід забезпечує необхідний аналітичний базис для переходу до розгляду модифікованих композитів у наступних розділах.

Таблиця 1.7

**Порівняльні фізико-механічні та теплофізичні характеристики базових полімерних матриць**

Полімер	Щільність, г/см <sup>3</sup>	Міцність на розтяг, МПа	Модуль Юнга, ГПа	Температура плавлення, °С	Робоча температура, °С	Водопоглинання, % (RH=100%)	Відносне подовження, %	Твердість, Shore D
РА6	1.13	70–80	2.6–3.0	220–223	до 100	до 9	40–80	75–80
РА66	1.12–1.16	80–100	2.8–3.2 (типово)	255–265	120–180 (короткочасно до 200)	до 8	20–60	80–85
PS	1.04–1.06	35–55	3.0–3.5	240–250	до 70–90 (короткочасно до 100)	0.03–0.1	1–3	75–80
PET	1.34–1.40	55–75	2.5–2.8	250–260	до 120 °С (короткочасно до 150 °С)	<0.5	30–60	80–85
Peek	1.30–1.32	90–100	3.6–4.0	~ 343	до 250–260 °С (тривале використання)	<0.05	20–50 %	85–95
PTFE	2.13–2.23	20–35	0.4–1.5	325–335	–200...+260	<0.01	200–400	50–60
РОМ-Н	1.41–1.43	65–75	2.8–3.2	172–184	–50...+100	0.20–0.25	15–35	80–90
РОМ-С	1.39–1.42	60–70	2.5–3.0	160–175	–50...+100	0.20–0.25	20–60	80–85

Відмінності між інженерними термопластами загального призначення та високопродуктивними системами для критичних режимів підкреслюють необхідність цілеспрямованої модифікації матриць наповнювачами, що забезпечує досягнення необхідного рівня зносостійкості та стабільності.

## 1.2 - Наповнювачі та модифікатори полімерних композитів триботехнічного призначення

Наповнювачі є ключовим інструментом керування властивостями полімерних композитів, оскільки саме вони визначають баланс між міцністю, коефіцієнтом тертя, теплопровідністю та здатністю матеріалу до структурної адаптації. Залежно від природи та морфології, наповнювачі виконують різні функції: від створення силового каркаса (волокна) до стабілізації тертя (тверді мастила) та модифікації міжфазного шару на нанорівні (наночастинки, нанотрубки).

У цьому підрозділі систематизовано основні типи наповнювачів, їхні функціональні ролі, рекомендовані матриці та очікувані ефекти, що дозволяє обґрунтовано визначати оптимальні комбінації для створення високонадійних антифрикційних систем.

Таблиця 1.8

### Матриця функціональної ролі наповнювачів у дослідних системах

Тип наповнювача	Основна мета введення	Рекомендовані матриці	Очікуваний ефект
Волокна (CF/GF)	Армування	PEEK, PA6, PET	Підвищення модуля Юнга, опір повзучості
Тверді мастила	Зниження тертя	POM, PA66, PEEK	Усунення stick-slip ефекту, зниження КТ
Наночастинки (SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Зносостійкість	Усі типи (особливо PTFE, PS)	Зміцнення міжфазного шару, стабільна плівка
Нанотрубки (CNTs)	Термостабільність	PEEK, PTFE, PA6	Відведення тепла, електропровідність

### 1.2.1 Вуглецеві волокна (CF): армування та підвищення міцності.

Вуглецеві волокна (CF) є одними з найбільш ефективних армуючих наповнювачів для полімерних композитів триботехнічного призначення. Вони характеризуються високим модулем пружності (230–600 ГПа), питомою міцністю та низькою густиною, що робить їх придатними для роботи в умовах високих навантажень і температур [96]. Додавання CF до полімерної матриці, зокрема PA6, PEEK чи PTFE, забезпечує суттєве підвищення механічної міцності, жорсткості, термостійкості та зносостійкості [97]. У композитах PA6+CF та PEEK+CF спостерігається зниження коефіцієнта тертя (до 0,12–0,18) та зменшення інтенсивності зношування у 2–3 рази порівняно з ненаповненими поліамідами. Так, у роботі показано, що додавання 30% CF до PA6 підвищує межу міцності на розрив до 160–170 МПа, модуль пружності – до 14–16 ГПа, при цьому коефіцієнт тертя знижується до 0.12–0.15, а інтенсивність зношування зменшується майже втричі [98].

Механізм дії CF полягає у зміцненні міжфазного шару та підвищенні жорсткості композиту [99]. Волокна ефективно переносять навантаження від полімерної матриці, зменшують локальні напруження та запобігають утворенню тріщин. Додатково CF підвищують теплопровідність композиту, що зменшує локальний перегрів у зоні тертя та знижує швидкість зношування [100]. Важливим чинником є якість міжфазного зчеплення: поверхнева функціоналізація волокон (наприклад, покриття полідопаміном чи силікагелем) підвищує адгезію та покращує трибологічні характеристики [101].

Особливо перспективним є поєднання CF з іншими наповнювачами, такими як тверді мастила (PTFE, графіт) чи наночастинки. У таких системах досягається синергічний ефект: одночасне зміцнення матриці, формування стабільної плівки перенесення та підвищення теплопровідності [102]. Наприклад, у композитах PEEK+10%CF+10%PTFE+10%Graphite коефіцієнт тертя знижується до 0.08–0.10, а інтенсивність зношування – до  $2.4 \times 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/Н·м, що свідчить про ефективність комбінованого підходу [103].

### 1.2.2 Скловолокна (GF): жорсткість і стабільність структури.

Скляні волокна (GF) є економічно вигідним армуючим наповнювачем із високою міцністю (2–4 ГПа) та модулем пружності (70–90 ГПа) [104]. Їх введення до полімерної матриці, зокрема PA6, PA66, POM чи PET, забезпечує підвищення механічної міцності, жорсткості, термостійкості та зносостійкості, хоча вплив на коефіцієнт тертя (КТ) є неоднозначним і залежить від концентрації та морфології волокон. У композитах PA6+30%GF та PA66+30%GF спостерігається підвищення КТ (до 0.18–0.29) порівняно з ненаповненими поліамідами, але водночас значно зростає зносостійкість, що проявляється у зменшенні інтенсивності зношування у 2–3 рази [105]. Такий ефект пояснюється тим, що GF підвищують жорсткість і несучу здатність композиту, проте їхні абразивні властивості можуть спричиняти додаткове мікрорізання та підвищення КТ, особливо при недостатньому зчепленні з матрицею.

Механізм дії GF полягає у зміцненні міжфазного шару та підвищенні опору пластичній деформації, що зменшує глибину проникнення контртіла та знижує швидкість зношування. Водночас при високій концентрації або слабкому зчепленні волокон можливе їх випадання з матриці, що призводить до абразивного зношування та підвищення КТ. Для покращення міжфазної адгезії застосовують силанізацію GF, яка забезпечує ковалентне зв'язування з полімерною матрицею, знижує ймовірність випадання волокон і підвищує зносостійкість композиту [106].

Перспективним напрямом є комбінування GF із твердими мастилами (PTFE, MoS<sub>2</sub>), що дозволяє компенсувати їхній абразивний ефект та знизити КТ. Так, у композитах PA66+30%GF+15%PTFE чи POM+15%PTFE+15%GF коефіцієнт тертя знижується до 0.10–0.12, а зносостійкість суттєво підвищується завдяки одночасному зміцненню матриці та формуванню стабільної плівки перенесення [107].

Приклади композицій підтверджують ефективність GF у різних системах: PA6+30%GF характеризується КТ  $\approx$  0.18–0.29 та зменшенням інтенсивності зношування у 2–3 рази; PA66+30%GF+15%PTFE демонструє КТ  $\approx$  0.10–0.12 та високу зносостійкість

завдяки синергії армування та змашування; POM+15%PTFE+15%GF забезпечує КТ  $\approx$  0.10 при одночасному зниженні інтенсивності зношування у 2–3 рази.

Таким чином, GF є ефективним і економічно доцільним армуючим наповнювачем, який значно підвищує міцність і зносостійкість полімерних композитів, хоча його вплив на коефіцієнт тертя потребує додаткової оптимізації. Використання методів поверхневої модифікації та комбінування з твердими мастилами дозволяє досягти балансу між жорсткістю, зносостійкістю та низьким тертям, що визначає перспективність GF у створенні високоефективних трибологічних матеріалів.

### **1.2.3 Графіт: формування плівок перенесення та зниження тертя.**

Графіт є класичним твердим мастильним наповнювачем із шаруватою структурою, яка забезпечує низький коефіцієнт тертя (0.08–0.15) завдяки легкому міжшаровому ковзанню [108]. Його введення до полімерної матриці, зокрема PTFE, PA6, PEEK чи POM, сприяє зниженню коефіцієнта тертя, проте вплив на інтенсивність зношування залежить від концентрації та типу матриці. У композитах PTFE+10–20%Graphite коефіцієнт тертя знижується до 0.08–0.12, а інтенсивність зношування може зменшуватися у 2–3 рази завдяки формуванню змішаної плівки перенесення (PTFE+Graphite) на поверхні контртіла. Водночас надмірна концентрація графіту (>15–20%) може призводити до зниження механічної міцності композиту та підвищення інтенсивності зношування через агрегацію частинок і зниження когезії матриці [109].

Механізм дії графіту полягає у його здатності виступати твердим мастильним агентом. Слабкі ван-дер-ваальсові зв'язки між шарами забезпечують легке ковзання, а під час тертя графітові пластини відшаровуються, формуючи на поверхні контртіла тонку плівку, яка знижує адгезію та коефіцієнт тертя. У поєднанні з PTFE або іншими полімерними матрицями графіт сприяє утворенню змішаної плівки перенесення, що додатково підвищує зносостійкість композиту [110].

Особливе значення має синергія графіту з іншими наповнювачами, такими як PTFE, вуглецеві волокна чи дисульфід молібдену. У таких системах досягається

комплексний ефект: одночасне зміцнення матриці, формування стабільної плівки перенесення та підвищення теплопровідності. Наприклад, у композитах PEEK+10%CF+10%PTFE+10%Graphite коефіцієнт тертя знижується до 0.09, а інтенсивність зношування – до  $2.4 \times 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/Н·м, що демонструє синергію армування, змащування та теплопровідності [111].

#### **1.2.4 Дисульфід молібдену (MoS<sub>2</sub>): тверде мастило для стабілізації коефіцієнта тертя.**

Дисульфід молібдену (MoS<sub>2</sub>) є класичним твердим мастильним наповнювачем із шаруватою структурою, що забезпечує низький коефіцієнт тертя (0.03–0.12) та високу зносостійкість у полімерних композитах [112]. Його введення до матриць на основі PA6, PEEK, PTFE чи POM дозволяє знизити коефіцієнт тертя до 0.09–0.12 та зменшити інтенсивність зношування у 2–5 разів, особливо при оптимальній концентрації (0.3–5% мас.). У композитах PA6+MoS<sub>2</sub> коефіцієнт тертя знижується до 0.09–0.12, а інтенсивність зношування зменшується у 2–3 рази порівняно з ненаповненим PA6 [113]. Для систем PTFE+MoS<sub>2</sub> оптимальний ефект спостерігається при 2–5% мас., особливо за підвищених температур (200–250 °C), де коефіцієнт тертя знижується до 0.14, а інтенсивність зношування сягає  $4.2 \times 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>/Н·м [114].

Механізм дії MoS<sub>2</sub> ґрунтується на слабких міжшарових зв'язках, що забезпечують легке ковзання та формування тонкої плівки на поверхні контртіла. Така плівка знижує адгезію та коефіцієнт тертя, одночасно захищаючи полімерну матрицю від абразивного зношування [115]. Крім того, MoS<sub>2</sub> може брати участь у трибохімічних реакціях, утворюючи міцні адгезійні зв'язки з металевими поверхнями, що додатково підвищує зносостійкість композиту.

Ефективність MoS<sub>2</sub> значно зростає при його комбінуванні з іншими наповнювачами, такими як вуглецеві чи скляні волокна та PTFE. Наприклад, у композитах PA6+GF+MoS<sub>2</sub> коефіцієнт тертя знижується до 0.09–0.12, а зносостійкість

підвищується у 3–4 рази завдяки одночасному зміцненню матриці та мастильному ефекту.

### **1.2.5 PTFE як наповнювач: синергія з полімерною матрицею.**

Політетрафторетилен (PTFE) є унікальним полімером із наднизьким коефіцієнтом тертя (0.04–0.12), який широко застосовується як антифрикційна матриця або твердий мастильний наповнювач у композитах на основі PA6, PA66, POM, PET та PEEK. Його введення до складу полімерної системи забезпечує суттєве зниження коефіцієнта тертя (до 0.07–0.12), проте надмірна концентрація PTFE часто призводить до зниження механічної міцності через його низьку поверхневу енергію та слабку адгезію до більшості термопластичних матриць [116]. Для подолання цієї проблеми в сучасних дослідженнях використовують методи попередньої активації поверхні частинок PTFE (наприклад, плазмову обробку або хімічне травлення натрій-нафталіновими комплексами), що дозволяє покращити міжфазну взаємодію та стабілізувати фізико-механічні показники композитів [117, 118]. У системах PA6+GF+PTFE (5–15%) коефіцієнт тертя знижується до 0.09–0.12, а інтенсивність зношування зменшується у 2–3 рази [119].

Аналогічний ефект притаманний композитам POM+PTFE+GF, де PTFE виконує роль внутрішнього змащувача, мінімізуючи ефект «stick-slip» (переривчастого ковзання) та забезпечуючи стабільність ходу механізму [120].

Ефективність PTFE пояснюється його здатністю формувати на робочій поверхні контртіла тонку плівку перенесення (transfer film), яка нівелює мікрошорсткість металу та захищає матрицю від прямого абразивного контакту [121]. Водночас слабка когезія PTFE може спричинити нестабільність цієї плівки при підвищених температурах або високих питомих навантаженнях [122]. Критичним фактором стабільності плівки є теплопровідність композита: оскільки PTFE має низьку здатність до відведення тепла, локальне фрикційне розігрівання може призвести до розмазування матеріалу та катастрофічного зношування. Особливо перспективним є використання так званих

«трибологічних пакетів», де PTFE комбінується з армуючими волокнами (CF, GF) та іншими твердими мастилами (графіт, MoS<sub>2</sub>). У системах на основі PEEK такий підхід дозволяє реалізувати механізм «жорстко-гнучкого синергізму»: волокна вуглецю сприймають основне механічне навантаження, запобігаючи деформації матриці, тоді як PTFE та графіт формують стійку плівку перенесення, що знижує коефіцієнт тертя на 80% порівняно з чистим полімером. Оптимальний баланс властивостей зазвичай досягається при сумарному вмісті наповнювачів до 30%, де частка PTFE становить 10–15%, що гарантує високу зносостійкість у широкому діапазоні температур та швидкостей ковзання [123].

### **1.2.6 Діоксид кремнію (SiO<sub>2</sub>): наномодифікація та структурна адаптація.**

Діоксид кремнію є одним із найбільш ефективних неорганічних нанонаповнювачів для термопластичних матриць (PTFE, PA6, POM, PI). Його застосування у низьких концентраціях (0.5–5.0% мас.) дозволяє досягти радикального покращення триботехнічних характеристик без суттєвого збільшення крихкості композиту [124]. Ефективність SiO<sub>2</sub> зумовлена специфікою його взаємодії з полімерною матрицею та контртілом. Наявність гідроксильних груп (-OH) на поверхні наночастинок SiO<sub>2</sub> сприяє утворенню водневих зв'язків із макромолекулами полімерів (особливо в PA6 та PI) [125]. Це обмежує сегментарну рухливість ланцюгів, підвищуючи локальну жорсткість та опір пластичній деформації [126]. Наночастинки діють як «якорі» для вторинних структур. Утворена трибоплівка стає тоншою, міцнішою та має вищу адгезію до металевого контртіла, що перешкоджає прямому контакту «полімер-метал».

Зниження коефіцієнта тертя (КТ) до значень 0.09–0.13 пояснюється зменшенням реальної площі контакту та оптимізацією шорсткості контртіла за рахунок заповнення наночастинами мікробугорків поверхні. У композитах PTFE+SiO<sub>2</sub> (1–3%) коефіцієнт тертя знижується до 0.10–0.12, а інтенсивність зношування сягає  $1.2 \times 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/Н·м. Для систем PA6+SiO<sub>2</sub> спостерігається аналогічний результат: коефіцієнт тертя становить  $\approx 0.11$ –0.13, а інтенсивність зношування зменшується у 2–3 рази [127].

Особливий науковий інтерес у контексті розробки високонавантажених вузлів тертя викликають гібридні нанокompозити на основі сумішей поліефірсульфону та полііміду (PES/PI). Дослідження продемонстрували, що введення наночастинок діоксиду кремнію ( $\text{SiO}_2$ ) та міді (Cu) у поліімідну фазу суміші дозволяє досягти синергетичного ефекту, який радикально змінює механізм зношування матеріалу [128]. У той час як для базової системи PES/PI характерним є інтенсивний абразивний знос із розривною та нерівномірною деформацією фрикційного інтерфейсу, гібридне наповнення сприяє стабілізації поверхневих процесів. Роль наночастинок  $\text{SiO}_2$  у цій системі передусім полягає в антифрикційній модифікації поверхні. Завдяки так званому «ефекту тіл кочення» (roller effect), діоксид кремнію забезпечує зниження коефіцієнта тертя на 24,4% порівняно з базовою матрицею.

Механізм дії  $\text{SiO}_2$  полягає у суттєвому покращенні безперервності та однорідності деформації в зоні контакту. Це перешкоджає інтенсивному руйнуванню плівки переносу, що є критично важливим для підтримки стабільного режиму ковзання та зниження енергетичних втрат на тертя. Натомість наночастинок міді виступають домінуючим чинником підвищення зносостійкості композиту. Встановлено, що додавання Cu забезпечує зниження інтенсивності зношування на 55.5%, хоча її вплив на коефіцієнт тертя є мінімальним (близько 2.2%). Мідь ефективно покращує безперервність деформації фрикційного інтерфейсу, проте при індивідуальному використанні вона може спричиняти нерівномірність деформаційного поля. Це призводить до передчасного зносу трибоплівки, що обмежує антифрикційний потенціал чисто мідних нанокompозитів.

Синергія проявляється у здатності  $\text{SiO}_2$  нівелювати негативний вплив міді на рівномірність деформації, одночасно використовуючи її здатність до зміцнення плівки переносу. У такий спосіб гібридна система забезпечує одночасну безперервність та високу гомогенність деформаційних процесів у зоні тертя, що дозволяє суттєво покращити як антифрикційні, так і протизносні властивості композитів на основі PES/PI.

### **1.2.7 Оксид алюмінію ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ): підвищення зносостійкості та теплопровідності.**

Наночастинки оксиду алюмінію ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) є ефективним модифікатором для підвищення зносостійкості, жорсткості та теплопровідності полімерних композитів. Введення наповнювача у концентрації 0.5–5% мас. до матриць PTFE, POM та PS забезпечує зниження коефіцієнта тертя (КТ) до значень 0.09–0.12 та зменшення інтенсивності зношування (ІЗ) у 2–5 разів [129]. Ефективність ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) зумовлена його здатністю зміцнювати міжфазний шар та підвищувати опір матриці пластичній деформації [130]. Завдяки розвиненій питомій поверхні наночастинок забезпечується висока адгезійна взаємодія з полімером, що сприяє формуванню на контртілі стійкої та рівномірної плівки перенесення завтовшки 100–200 нм.

Додатковою перевагою є підвищення теплопровідності композиту, що мінімізує локальний перегрів у зоні фрикційного контакту. Дослідження впливу стану міжфазної межі на теплофізичні властивості композитів, армованих ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), підтверджують, що ключовим фактором покращення теплопровідності є функціоналізація поверхні наночастинок. Зокрема, встановлено, що модифікація аміногрупами забезпечує вищу ефективність порівняно з епоксидними групами або капсулюванням частинок графен-оксидом (GO). Це зумовлено формуванням сильної адгезійної взаємодії на межі «наповнювач–матриця», що мінімізує термічний опір та сприяє стабілізації термомеханічних властивостей матеріалу [131].

Особливий науковий інтерес становить комбінування оксиду алюмінію з іншими нанооксидами ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ). Зокрема, у гібридних системах (наприклад, на основі епоксидних смол — EP) поєднання 3%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та 3%  $\text{SiO}_2$  дозволяє досягти екстремально низького КТ ( $\approx 0.04$ ) та мінімального зносу завдяки синергії механічного зміцнення та оптимізації структури вторинних шарів (плівки перенесення).

### **1.2.8 Вуглецеві нанотрубки (CNTs): нанопідсилення та міжфазне зміцнення.**

Вуглецеві нанотрубки (CNTs) належать до класу унікальних одновимірних нанонаповнювачів, що характеризуються екстремально високими показниками

механічної міцності, жорсткості, тепло- та електропровідності. Введення CNTs у низьких концентраціях (0.1–2.0% мас.) до матриць PA6, PTFE, PEEK та POM дозволяє суттєво оптимізувати триботехнічні властивості композитів, забезпечуючи зниження коефіцієнта тертя (КТ) до значень 0.06–0.10 та зменшення інтенсивності зношування (ІЗ) у 3–10 разів.

Висока ефективність вуглецевих нанотрубок (CNTs) зумовлена їхньою здатністю виконувати подвійну роль у зоні фрикційного контакту, діючи одночасно як структурний зміцнювач та функціональний модифікатор поверхні. Завдяки високому аспекту (відношенню довжини до діаметра), нанотрубки ефективно стримують ініціювання та поширення мікротріщин у матриці. Механізм «містокового з'єднання» (bridging effect), що реалізується при введенні CNTs, суттєво підвищує в'язкість руйнування та опір матеріалу втомному руйнуванню, що є критичним для довговічності вузлів тертя при циклічних навантаженнях [132, 133].

У процесі динамічного контакту CNTs інтенсифікують формування адгезійно стійкої вуглецевмісної плівки перенесення на поверхні металевого контртіла. Встановлено, що наявність нанотрубок сприяє утворенню більш гомогенного та щільного захисного шару, який ізолює полімер від прямої механічної взаємодії з мікрошорсткостями металу. Така плівка мінімізує адгезійну складову сили тертя, трансформуючи режим взаємодії у зсув між вторинними структурами, що радикально знижує інтенсивність зношування композита [134].

Важливим фактором стабілізації трибосистеми є висока власна теплопровідність багат шарових вуглецевих нанотрубок (MWCNTs), яка забезпечує інтенсивне відведення теплоти від фактичних плям контакту. Це запобігає локальному фрикційному розігріванню до температур, що перевищують точку склування або плавлення матриці, тим самим нівелюючи ризики термічної деградації та небажаної пластифікації поверхневих шарів полімеру. Ефективна дисипація теплової енергії через мережу нанотрубок дозволяє зберігати високу жорсткість поверхні навіть за

інтенсивних режимів експлуатації, що забезпечує стабільність коефіцієнта тертя в часі [135].

PA6 + 0.5% MWCNTs: встановлено зниження КТ з 0.19 до 0.12 при одночасному зменшенні ІЗ майже втричі (з  $3.2 \times 10^{-6}$  до  $1.1 \times 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/Н·м). Ключовим чинником тут є покращення міжфазного зчеплення за рахунок функціоналізації нанотрубок (аміногрупи, силанізація), що забезпечує рівномірну дисперсію наповнювача

PTFE + 1% MWCNTs: спостерігається зниження КТ до 0.08, при цьому зносостійкість зростає у 5–10 разів. Такий результат досягається завдяки синергії між антифрикційною матрицею та зміцнюючими нанотрубками, що перешкоджають «викришуванню» м'якої фази PTFE [136].

Найвищі експлуатаційні показники досягаються при комбінуванні CNTs із макронаповнювачами (вуглецеві волокна CF, скловолокна GF) та твердими мастилами (графіт, MoS<sub>2</sub>). У складних гібридних системах, таких як PEEK+CF+CNTs+Graphite, реалізується концепція багаторівневого зміцнення. У такій структурі макроволокна виконують роль основного каркаса, що сприймає зовнішнє механічне навантаження, тоді як нанотрубки створюють додаткову нанорозмірну сітку в міжволоконному просторі. Це дозволяє ефективно перерозподіляти напруження від матриці до волокон, запобігаючи відшаруванню та викришуванню волокон із полімеру при інтенсивному терті [137]. Додатково, синергія CNTs та графіту забезпечує формування надзвичайно стійкої гібридної плівки перенесення. Нанотрубки в цьому процесі відіграють роль «механічних якорів», які утримують лусочки графіту та фрагменти зносу на поверхні контртіла, роблячи змащувальний шар більш стійким до високих швидкостей ковзання та значних питомих тисків. Такий інтегрований підхід забезпечує екстремально низькі показники зношування навіть у важких режимах експлуатації, де мононаповнені композити зазвичай втрачають стабільність [138].

## Висновки до розділу 1.

Проведений аналіз дозволив систематизувати розглянуті полімерні матриці та наповнювачі за їхніми ключовими характеристиками й функціональною роллю у трибологічних композитах. Матеріали, що були предметом огляду (РА6, РА66, PS, PET, POM, PEEK та PTFE), умовно поділяються на дві групи. Перша охоплює інженерні термопласти загального та технічного призначення (РА6, РА66, POM-Н, POM-С, PET, PS), які характеризуються оптимальним поєднанням вартості та технологічності, проте потребують модифікації для ефективної роботи у вузлах тертя. Друга група представлена високопродуктивними полімерними системами (PEEK та PTFE), що вирізняються винятковою хімічною стійкістю та термостійкістю і можуть слугувати основою для композитів, здатних працювати у критичних режимах експлуатації.

Наповнювачі, які були розглянуті у дослідженні (CF, GF, графіт, дисульфід молібдену ( $\text{MoS}_2$ ), PTFE як твердий мастильний компонент, а також нанодисперсні  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та CNTs), виконують різні функції залежно від своєї природи та геометричної розмірності. Волокнисті армуючі наповнювачі створюють силовий каркас і сприймають основні механічні навантаження; тверді мастила стабілізують коефіцієнт тертя та сприяють формуванню плівок перенесення; наночастинки забезпечують модифікацію матриці на міжфазному рівні, підвищуючи її зносостійкість навіть при низьких концентраціях. Узагальнена матриця функціональних ролей наповнювачів, наведена у цьому розділі, наочно демонструє їхній внесок у формування трибологічних властивостей композитів.

Незважаючи на широку номенклатуру доступних модифікаторів, досягнення синергетичного ефекту у трибосистемах залишається складним науковим завданням. Особливу увагу привертає нанодисперсний діоксид кремнію ( $\text{SiO}_2$ ), який завдяки специфічній взаємодії з полімерними матрицями, особливо при використанні функціоналізації поверхні, може виступати універсальним модифікатором для підвищення триботехнічного ресурсу матеріалів. Водночас слід наголосити, що даний напрямок досліджень ще не є достатньо опрацьованим, а отже має високу актуальність

для сучасної науки та інженерії. Саме дослідженню механізмів впливу  $\text{SiO}_2$  на структуру та властивості обраних полімерів, а також експериментальній перевірці їхніх трибологічних характеристик на спеціально створеній випробувальній установці будуть присвячені наступні етапи роботи.

## РОЗДІЛ 2

### ОБ'ЄКТИ, МЕТОДИКИ ТА УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПКМ

У другому розділі обґрунтовано вибір об'єктів дослідження, описано технологію їх підготовки та представлено експериментально-технічну базу для аналізу трибологічної поведінки полімерних композитів. Об'єкти дослідження (підрозділ 2.1) представлені двома групами: промисловими термопластами (Sustamid, Sustapeek, Zedex), що виконують роль еталонних матеріалів, та експериментальними композитами на основі реактопластичної матриці Epikote LR285. Введення дисперсного графіту (8%, 15%, 20%) та застосування багатоступеневого режиму полімеризації (з фінальною стабілізацією при 80°C, дозволили отримати зразки з високою розмірною стабільністю та прогнозованими антифрикційними властивостями. Методологія випробувань (підрозділ 2.2) базується на стандарті ISO 7148-2 (метод В) за схемою «блок-на-кільці». Даний підхід забезпечує стабільність площі контакту та ефективне відведення тепла через сталеве контртіло (сталь 30ХГСА), що максимально наближає лабораторні умови до реальних режимів роботи підшипників ковзання при швидкостях 1.4–5.5 м/с. Метрологічне забезпечення роботи (підрозділ 2.2.2) охоплює комплексний моніторинг температури, моменту тертя та зношування. Використання датчиків Pt100 за чотирипровідною схемою та перерахунок даних за рівняннями ITS-90 (6-го порядку) у поєднанні з безконтактною пірометрією гарантує прецизійність теплового аналізу. Усі засоби вимірювальної техніки пройшли процедуру калібрування згідно з вимогами ISO/IEC 17025. Технічні характеристики та кінематика розробленої установки (підрозділ 2.2.3) створюють необхідну базу для дослідження ефектів структурної адаптації, результати якого представлені у наступних розділах.

Окрему увагу в межах розділу приділено забезпеченню статистичної значущості та відтворюваності експериментальних даних шляхом багаторазового дублювання випробувань за ідентичних умов навантаження. Розроблений алгоритм синхронізації трибометричних і температурних параметрів у реальному часі дозволив ідентифікувати

енергетичні межі стійкості досліджуваних систем без ризику втрати інформації про перехідні режими тертя. Таким чином, сформований методичний апарат та прецизійний інструментарій становлять цілісну дослідницьку систему, яка дозволяє мінімізувати вплив випадкових чинників і гарантує наукову обґрунтованість подальших висновків щодо ресурсу полімерних вузлів тертя

## **2.1 Об'єкти дослідження та їх підготовка**

У дослідженні використано промислові полімерні матеріали та композиції, що характеризуються різним рівнем термостійкості, міцності та здатності до структурної адаптації у вузлах тертя. Вибір об'єктів був зумовлений необхідністю порівняльної оцінки базових матриць і модифікованих систем, а також визначення їхньої придатності для роботи в умовах інтенсивних навантажень. Підготовка зразків здійснювалася відповідно до стандартних методик, що забезпечують відтворюваність результатів та коректність подальших триботехнічних випробувань

### **2.1.1 Промислові термопластичні матеріали**

Вибір конструкційних полімерів для роботи у вузлах тертя системи з підвищеними вимогами надійності потребує системного аналізу їхніх фізико-механічних та теплофізичних властивостей. З метою встановлення впливу хімічної природи матриці та наявності модифікуючих добавок на процеси фрикційної взаємодії, як об'єкти дослідження було обрано групу високоефективних термопластів та полімерних сплавів виробництва провідних галузевих компаній — Röchling Engineering Plastics та Wolf Kunststoffgleitlager (Zedex) [139].

Обрана номенклатура матеріалів (Sustamid 6, Sustapei, Sustamid 6G OL, Sustapeek GF30, Sustadur GLD, Sustamid 66, Sustadur PET, Zedex ZX-100K та Zedex ZX-324V2T) представляє собою репрезентативну вибірку сучасних триботехнічних рішень. Дані матеріали класифіковано за функціональним призначенням на три основні групи:

Базові інженерні термопласти (групи PA6, PA66, PET), що використовуються як еталони для оцінки ефективності подальшої модифікації.

Самозмащувальні композити (Sustamid 6G OL, Sustadur GLD, Zedex ZX-100K), що містять у структурі антифрикційні добавки для стабілізації коефіцієнта тертя.

Високотемпературні та армовані системи (PEI, PEEK), призначені для експлуатації в умовах підвищених питомих навантажень та термічного впливу.

Такий підхід дозволяє провести комплексний порівняльний аналіз трибологічної поведінки матеріалів у широкому діапазоні навантажувально-швидкісних режимів, що моделюються на розробленій експериментальній установці.

Таблиця 2.1

### Порівняльна таблиця фізико-механічних і трибологічних параметрів

Торгова назва	Виробник	Базовий полімер	Густина (г/см <sup>3</sup> )	Робоча температура (°C)	Модуль пружності (МПа)	Коефіцієнт тертя (сталь, сухе тертя)	Наповнювач (тип)
Sustamid 6	Röchling	PA6	1.14	-40... +85 (+160)	3200 - 3300	0.35 - 0.42	Немає (чистий)
Sustamid 66	Röchling	PA66	1.15	-30... +95 (+170)	3300	0.35 - 0.40	Немає (чистий)
Sustamid 6G OL	Röchling	PA 6 G (Литий)	1.14	-40... +110 (+160)	3300	0.15 - 0.18	Рідке мастило (Олива) + Стабілізатори
Sustadur PET	Röchling	PET	1.38	-20... +115 (+180)	3000 - 3300	0.20 - 0.25	Немає (напівкристалічний)
Sustadur GLD	Röchling	PET	1.44	-20... +115 (+180)	3300	0.12 - 0.15	Тверде мастило
Sustapei	Röchling	PEI	1.27	-50... +170 (+210)	3200	0.20 - 0.40	Немає
Sustapeek GF30	Röchling	PEEK	1.51	-20... +250 (+310)	6300	0.28 - 0.35	30% Скловолокно
Zedex ZX-100K	Wolf Kunststoffgleitlager	PET-сплав	1.35	-100... +110 (+140)	2900 - 3300	0.08 - 0.11	Спец. добавки (без PTFE)
Zedex ZX-324 V2T	Wolf Kunststoffgleitlager	PEEK	1.33	-50... +250 (+260)	3500 - 3900	0.13	PTFE (Тефлон)

Група поліамідів (РА6, РА66) представлена матеріалами Sustamid 6 та Sustamid 66, які є класичними представниками екструзійних нейлонів. Sustamid 6 характеризується густиною  $1.14 \text{ г/см}^3$  та модулем пружності в межах 3200–3300 МПа. Слід враховувати гігроскопічність РА6, оскільки при насиченні вологою його жорсткість може суттєво знижуватися, що впливає на стабільність трибологічних показників. Sustamid 66 пропонує вищу термостабільність (температура плавлення  $260^\circ\text{C}$  проти  $220^\circ\text{C}$  у РА6) та краще зберігає жорсткість при нагріванні. Коефіцієнт тертя обох матеріалів по сталі у сухому режимі є відносно високим (0.35–0.42), що зумовлює інтенсивне тепловиділення у вузлах тертя та актуалізує використання датчиків Pt100 для моніторингу зони контакту [140].

Окреме місце посідає Sustamid 6G OL — литий поліамід з інтегрованим рідким мастилом. Завдяки модифікації, коефіцієнт тертя знижується до 0.15–0.18, що дозволяє нівелювати ефект «stick-slip» (переривчастого ковзання) та розширити робочий температурний діапазон до  $+110^\circ\text{C}$  [141].

Група термопластичних поліестерів (РЕТ) розглядається як стабільна альтернатива поліамідам у вологих середовищах завдяки відсутності амідних груп. Sustadur РЕТ (густина  $1.38 \text{ г/см}^3$ ) характеризується високою твердістю та низькою повзучістю. Його трибологічно оптимізована версія Sustadur GLD містить тверде мастило, що підвищує густину до  $1.44 \text{ г/см}^3$  та знижує коефіцієнт тертя до 0.12–0.15 [142].

Особливий інтерес для дослідження становить композит Zedex ZX-100K. Виробник Wolf Kunststoff-Gleitlager модифікував РЕТ-матрицю для підвищення еластичності та зносостійкості. Матеріал демонструє рекордно низький коефіцієнт тертя (0.08–0.11) [143], що дозволяє розглядати його як ефективну заміну бронзовим сплавам у вузлах ковзання, які не потребують обслуговування.

Група високоефективних полімерів (РЕІ, РЕЕК). Дана категорія матеріалів призначена для експлуатації в екстремальних умовах. Sustapei (РЕІ) — аморфний поліефірімід з високою температурою склування ( $217^\circ\text{C}$ ), що зберігає механічну

міцність до  $+170^{\circ}\text{C}$  [144]. Проте через високий коефіцієнт тертя (0.2–0.4) він частіше застосовується як конструкційний елемент, ніж як антифрикційний.

Zedex ZX-324 V2T представляє собою високотехнологічну модифікацію на основі чистого поліефірефіркетону (PEEK), яка була спеціально розроблена для роботи в умовах екстремального трибологічного навантаження. На відміну від склонаповнених марок (наприклад, GF30), які через свою абразивність можуть пошкоджувати контртіло, модифікація V2T містить у своєму складі дисперсний політетрафторетилен (PTFE), що докорінно змінює механізм фрикційної взаємодії.

Густина матеріалу становить  $1.33 \text{ г/см}^3$ , що є дещо більшим значенням порівняно з чистим PEEK ( $1.30\text{--}1.32 \text{ г/см}^3$ ) через інтеграцію PTFE. Модуль пружності при розтягуванні становить близько 3500 МПа, що забезпечує необхідну жорсткість при збереженні високої ударної в'язкості. Завдяки наявності PTFE, матеріал демонструє низький статичний коефіцієнт тертя ( $\sim 0.13$ ) та здатність до роботи при високих швидкостях ковзання (до 200 м/хв) [145]. Це робить його ідеальним об'єктом для вивчення процесів теплоутворення у високошвидкісних парах тертя. Матеріал зберігає працездатність у надширокому діапазоні температур: від  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+250^{\circ}\text{C}$  (з можливістю короткочасного пікового навантаження до  $+260^{\circ}\text{C}$ ). Це робить його еталонним матеріалом для критичних вузлів у стратегічних галузях. У машинобудуванні він виступає прецизійною заміною бронзовим сплавам у необслуговуваних парах тертя, у фармацевтиці забезпечує стерильність та хімічну інертність при високих температурах автоклавування, а в авіабудуванні гарантує надійність механізмів крила та паливних систем в умовах екстремальних термічних навантажень.

### **2.1.2 Розробка та склад експериментальних композитів на основі реактопластичної матриці.**

Аналіз широкого спектра промислових термопластів (РА6, РОМ, PEEK тощо), проведений у першому розділі, продемонстрував їхню високу ефективність у вузлах тертя, проте також окреслив межі їх застосування, зумовлені термопластичною

природою матриць. Зокрема, схильність до теплового розм'якшення та повзучості під навантаженням спонукає до пошуку альтернативних рішень у галузі реактопластичних систем. Науковий інтерес до створення експериментальних композитів на основі епоксидних матриць зумовлений можливістю формування жорсткої тривимірної зшитої структури, що забезпечує стабільність механічних властивостей у широкому діапазоні температур та високу адгезію до антифрикційних наповнювачів.

Для порівняльного дослідження закономірностей структурної адаптації було обрано три концептуально різні підходи до формування триботехнічних матеріалів. По-перше, це промисловий стандарт високопродуктивних систем — Zedex ZX-324V2T, де матриця РЕЕК поєднується з PTFE для досягнення балансу міцності та низького тертя. По-друге, це композит ПС-6, отриманий методом суспензійної полімеризації, де графіт інтегрується безпосередньо в процесі синтезу полістиролу. Третім, експериментальним напрямком, стало розроблення композитів на основі авіаційної епоксидної смоли Epikote LR285, модифікованої дисперсним графітом.

Вибір системи Epikote LR285 як об'єкта дослідження є науково обґрунтованим з огляду на її низьку початкову в'язкість (600–900 мПа·с), що є критичним фактором для рівномірного розподілу графітового наповнювача та запобігання його седиментації під час виготовлення. Це дозволяє створювати високонаповнені (*highly filled systems*) системи з концентрацією графіту до 20.5%, забезпечуючи однорідність мікроструктури [146]. Порівняння такої реактопластичної системи з термопластичними аналогами (РЕЕК, ПС-6) дає змогу оцінити ефективність різних механізмів структурної адаптації — від механічної орієнтації макромолекул у полістиролі до формування вторинних антифрикційних структур в епоксидних композитах.

Для забезпечення достовірності результатів та стабільності властивостей експериментальних композитів було розроблено уніфіковану методику лабораторного виготовлення. З метою системного аналізу впливу наповнювача на трибологічну поведінку матриці, вміст графіту в композитах було стандартизовано на рівнях 8%, 15% та 20% за масою. Такий крок дозволяє чітко диференціювати зразки за ступенем

наповнення та спрощує інтерпретацію отриманих закономірностей структурної адаптації.

Епоксидна смола Epikote LR285 попередньо дегазувалася. Введення графітового порошку здійснювалося при постійному механічному перемішуванні. Завдяки низькій в'язкості смоли досягалася висока гомогенність суміші навіть при максимальному наповненні (20%). Важливим технологічним нюансом було попереднє нагрівання металевих форм до температури 35 °С. Це дозволило додатково знизити в'язкість системи в момент заливки, що забезпечило повне заповнення об'єму форми та мінімізувало ризик седиментації (осідання) важчих частинок графіту до початку процесу гелеутворення. Первинне затвердіння відбувалося протягом 24 годин при температурі 50–55 °С. Цей режим забезпечує формування стабільної молекулярної сітки без виникнення значних внутрішніх напружень.



Рис 2.1. Технологічна послідовність отримання лабораторних зразків антифрикційних матеріалів на основі реактопластичної матриці.

Для надання композитам експлуатаційної стійкості, необхідної для роботи у реальних вузлах тертя, зразки проходили етап додаткової термічної стабілізації. Встановлено, що стандартна термообробка забезпечує працездатність матеріалу до +54°С, що є достатнім для більшості вузлів ковзання. Проте для підготовки матеріалів до впровадження у високонавантажені авіаційні вузли з тепловим фоном до +72°С, було застосовано режим пост-затвердіння при температурі 80 °С [147]. Це гарантує

завершення процесів структурування матриці та виключає можливість її знеміцнення через локальний перегрів у зоні трибоконтакту.

Такий комплексний підхід до виготовлення дозволяє отримати матеріал із заданою мікроструктурою, що є критично важливим для подальшого дослідження мікротвердості та здатності до самоорганізації поверхонь тертя.

Таблиця 2.2

### Фізико-технічні характеристики системи EpiKote LR285

Параметр	Епоксидна смола (L 285)	Затверджувач (285–287)
Щільність, г/см <sup>3</sup>	1.18 – 1.23	0.94 – 0.97
В'язкість, мПа·с	600 – 900	50 – 100
Межа вогнестійкості	1.525 – 1.530	1.500 – 1.510
Колір	Світло-блакитний	Прозорий / Бурштиновий

Вибір дисперсного графіту як ключового наповнювача для системи EpiKote LR285 зумовлений його поліфункціональним впливом на трибосистему. Окрім забезпечення самозмащувальних властивостей за рахунок шаруватої структури кристалічної ґратки, графіт відіграє критичну роль у термодинаміці контактної зони.

Оскільки епоксидна матриця має низьку природну теплопровідність, виникає ризик локального перегріву («гарячих точок»), що призводить до термічної деструкції полімеру [148]. Введення графіту дозволяє суттєво підвищити загальну теплопровідність композиту. Це забезпечує ефективне відведення надлишкового тепла від фактичних плям контакту та його рівномірний розподіл по всьому об'єму матеріалу. З наукової точки зору, такий розподіл температури є фундаментально важливим для моніторингу стабільності трибосистеми. Рівномірне температурне поле запобігає передчасному знеміцненню матриці та сприяє прогнозованому перебігу структурної адаптації, що дозволяє уникнути катастрофічного зношування при високих швидкостях ковзання (2.8–5.5 м/с) [149].

## **2.2. Експериментальна установка для дослідження процесів тертя та зношування**

Трибологічні випробування розроблених полімерних композитів є визначальним етапом у процесі створення та оцінки придатності матеріалів для підшипників ковзання та вузлів тертя, що функціонують у специфічних режимах сухого або граничного змащення. Обґрунтований вибір методики випробувань безпосередньо впливає на достовірність отриманих результатів та їхню кореляцію з реальними умовами експлуатації авіаційної та машинобудівної техніки. Сучасні міжнародні стандарти серій ISO (зокрема ISO 7148-2 у редакціях 1999 та 2026 років, ISO 20808:2016) та ASTM (G99-17, G77-17) регламентують базові схеми контактної взаємодії, параметри моніторингу та вимоги до обробки результатів. Використання зазначеної нормативної бази забезпечує високу відтворюваність експериментальних даних та дозволяє проводити коректний порівняльний аналіз антифрикційних властивостей експериментальних композитів із відомими промисловими аналогами [150].

### **2.2.1. Класифікація основних методів трибологічних випробувань полімерних композитів**

Трибологічні випробування розроблених полімерних композитів є визначальним етапом у процесі створення та оцінки придатності матеріалів для підшипників ковзання та вузлів тертя, що функціонують у специфічних режимах сухого або граничного змащення. Обґрунтований вибір методики випробувань безпосередньо впливає на достовірність отриманих результатів та їхню кореляцію з реальними умовами експлуатації авіаційної та машинобудівної техніки. Сучасні міжнародні стандарти серій ISO (зокрема ISO 7148-2 у редакціях 1999 та 2026 років, ISO 20808:2016) та ASTM (G99-17, G77-17) регламентують базові схеми контактної взаємодії, параметри моніторингу та вимоги до обробки результатів. Використання зазначеної нормативної бази забезпечує високу відтворюваність експериментальних даних та дозволяє проводити коректний порівняльний аналіз антифрикційних властивостей експериментальних композитів із відомими промисловими аналогами.

Вибір методології трибологічних випробувань є фундаментальним аспектом розробки полімерних композитів, оскільки геометричні та кінематичні параметри контакту безпосередньо визначають характер структурної адаптації та механізми зношування матеріалу. У сучасній дослідницькій практиці, згідно з міжнародними стандартами серій ISO та ASTM, виділяють декілька базових схем, кожна з яких має специфічні переваги та обмеження при дослідженні антифрикційних систем. Найбільш поширеною схемою для первинної оцінки триботехнічних характеристик є конфігурація «штифт-на-диску» (Pin-on-disk), що регламентується стандартами ASTM G99-17 та ISO 7148-2 (метод А) [151]. Вона базується на притисканні нерухомого індентора сферичної або циліндричної форми до обертового контртіла у вигляді диска. Популярність цього методу зумовлена високою відтворюваністю результатів та можливістю прецизійної реєстрації сили тертя й об'ємного зносу. Проте, при дослідженні полімерних композитів дана схема має суттєвий недолік — точковий або мікроплощинний характер контакту [152]. Це призводить до виникнення екстремальних локальних тисків, що не відповідає реальним умовам роботи більшості підшипників ковзання. Крім того, низька теплопровідність полімерних матриць у поєднанні з обмеженою площею контакту створює ризик термічної деструкції матеріалу, що викривлює дані про його зносостійкість.

Альтернативним підходом, спрямованим на максимальне наближення до експлуатаційних умов, є схема «вал-втулка» (Shaft-bearing), описана як метод С у стандарті ISO 7148-2. Дана модель дозволяє оцінювати трибологічну поведінку готових вузлів або вкладишів у конфігурації, де теплові ефекти та формування вторинних структур відбуваються у закритій системі [153]. Незважаючи на високу релевантність, метод характеризується значною складністю юстування зразків та підвищеними вимогами до точності вимірювальних систем. Крім того, постійне збільшення фактичної площі контакту внаслідок зношування ускладнює інтерпретацію кінетики структурних змін, що є критичним для фундаментальних досліджень процесів адаптації.

Проміжне положення, що поєднує технологічну гнучкість та репрезентативність результатів, займає схема «блок-на-кільці» (Block-on-ring), відома як метод В (ISO 7148-2) та ASTM G77-17. Вона передбачає контакт прямокутного або адаптованого під циліндричне кільце блоку з обертовим контртілом[154].

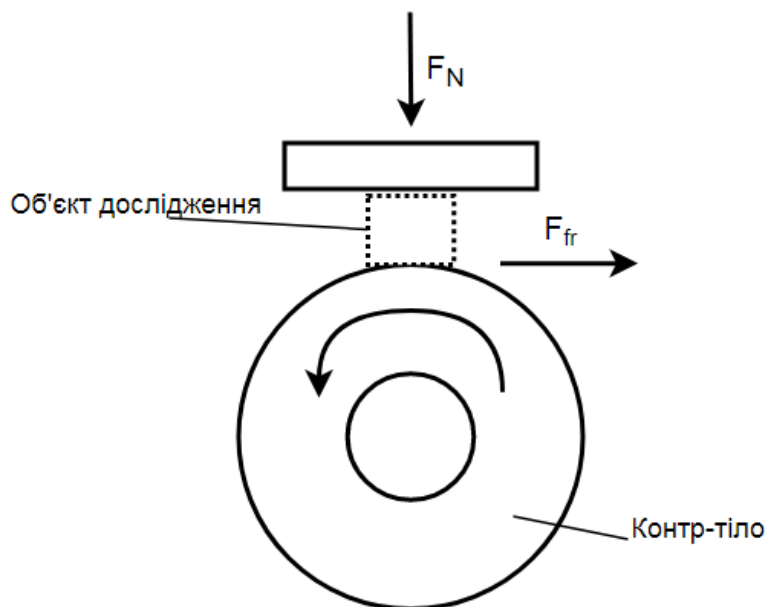


Рис. 2.2 Тест-метод «В» за ISO 7148-2:2012 – блок / штифт (об'єкт дослідження) на кільці (контр-тіло)

Головною перевагою даної схеми є можливість забезпечення стабільного теплового балансу за рахунок ефективного відведення енергії тертя через масивне металеве кільце. Це створює оптимальні умови для дослідження самозмащувальних композитів, оскільки сприяє рівномірному розподілу антифрикційних наповнювачів, таких як графіт, по поверхні тертя. Аналіз наведених методик дозволяє стверджувати, що для розроблення антифрикційних матеріалів підшипникового призначення найбільш доцільним є використання схем «блок-на-кільці» та «вал-втулка». При цьому схема забезпечує необхідний науковий компроміс: вона дозволяє моделювати реальні площі контакту та температурні режими, характерні для важконавантажених вузлів, зберігаючи при цьому простоту виготовлення зразків та високу точність моніторингу процесів. Саме цей метод було обрано як базовий для проведення експериментальних

досліджень у даній роботі, що дозволило об'єктивно оцінити вплив швидкості ковзання на зміну мікротвердості та зносостійкість розроблених епоксиграфітових композитів.

Таблиця 2.3

**Порівняльний аналіз основних методів трибологічних випробувань полімерних композитів**

Метод	Стандарт (ISO/ASTM)	Переваги для полімерів	Недоліки для полімерів
Штифт на диску Pin-on-disk	ISO 7148-2 (A), ASTM G99	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Простота, висока відтворюваність</li> <li>- Можливість тестування різних матеріалів</li> <li>- Швидка оцінка фрикційних властивостей</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Точковий контакт, не відповідає площі реального підшипника</li> <li>- Локальний перегрів полімерів</li> <li>- Висока чутливість до параметрів тесту</li> </ul>
Блок на кільці Block-on-ring	ISO 7148-2 (B), ASTM G77	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Площинний контакт</li> <li>- Моделювання умов підшипника ковзання</li> <li>- Відведення тепла через кільце</li> <li>- Гнучкість у виборі матеріалів</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Складність виготовлення блоку з армованих полімерів</li> <li>- Можлива неоднорідність змащенн</li> <li>- Вплив країв блоку на розподіл навантаження</li> </ul>
Вал–втулка Shaft-bearing	ISO 7148-2 (C)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Максимальна релевантність до реальних умов</li> <li>- Оцінка вузлів у збірці</li> <li>- Аналіз впливу геометрії</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Складність юстування</li> <li>- Тривалість випробувань</li> <li>- Зміна площі контакту через знос</li> <li>- Високі вимоги до точності вимірювань</li> </ul>
Куля на диску Ball-on-disk	ISO 20808	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Висока локалізація навантаження</li> <li>- Стандартизовано для керамік</li> <li>- Можливість аналізу тонких шарів</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Не відповідає умовам підшипників ковзання</li> <li>- Високий локальний тиск</li> <li>- Не рекомендовано для армованих полімерів</li> </ul>

Наукове обґрунтування вибору схеми «блок-на-кільці» (Method B ISO 7148-2) ґрунтується на низці факторів, що визначають адекватність моделювання умов роботи підшипників ковзання. По-перше, дана конфігурація забезпечує оптимальну відповідність площі контакту та розподілу механічних напружень. На відміну від точкової взаємодії, властивій схемі «штифт-на-диску», використання блоку дозволяє досягти рівномірного розподілу навантаження по ширині зразка. Згідно з результатами скінченно-елементного аналізу контактної взаємодії, у такій схемі формується стабільна «нормальна зона» з напруженнями порядку 0.5МПа, а також ідентифікуються критичні зони концентрації напружень (до 5.5 МПа), що повністю відповідає реальній динаміці навантаження промислових вузлів тертя та дозволяє прогнозувати локалізацію осередків зношування [155].

Окремої уваги заслуговує аспект термодинамічної стабільності. Оскільки досліджувані полімерні композити на епоксидній матриці характеризуються низькою власною теплопровідністю, критично важливим є запобігання акумуляції тепла в зоні контакту. У схемі «блок-на-кільці» сталеве контртіло виконує функцію ефективного радіатора (тепловідводу), що мінімізує ризик термічної деструкції полімеру та зміни його фізико-механічних властивостей. Це дозволяє об'єктивно оцінювати вплив теплопровідних наповнювачів, зокрема графіту, на перерозподіл температурних полів та підвищення зносостійкості системи. Важливою перевагою обраного методу є також можливість коректного моделювання режимів граничного змащення (boundary lubrication). Відповідно до положень ISO 7148-2:2012, схема дозволяє будувати криві Штрібека (Stribeck curves) для ідентифікації переходів між режимами тертя, що є фундаментальним для розуміння механізмів самозмащування в композитах [156]. Висока ступінь стандартизації та жорсткі вимоги до підготовки зразків (контроль орієнтації армуючих елементів, шорсткості та площинності) гарантують відтворюваність результатів та можливість їх валідації через міжлабораторні порівняння. Таким чином, сукупність факторів — від кінематичної відповідності реальним вузлам до гнучкості в управлінні параметрами змащення та навантаження —

підтверджує доцільність використання схеми «блок-на-кільці» як базової для досягнення мети дисертаційного дослідження.

### **2.2.2 Метрологічне забезпечення та системи моніторингу параметрів трибосполучення**

Для отримання достовірних та відтворюваних результатів експерименту в роботі реалізовано комплексний підхід до метрологічного забезпечення всіх вимірювальних каналів. Усі засоби вимірювальної техніки (ЗВТ), що входять до складу установки, пройшли процедуру калібрування та перевірки відповідно до вимог стандарту ДСТУ EN ISO/IEC 17025. Метрологічна простежуваність вимірювань забезпечується використанням каліброваних приладів та валідованих методик.

Визначення коефіцієнта тертя ( $\mu$ ) у реальному часі базується на безпосередній реєстрації моменту сили тертя, що виникає в зоні фрикційного контакту «блок–кільце». Для забезпечення високої точності вимірювань використано метод тензометрії типу, аналогічний за принципом дії системам, що застосовуються в прецизійних трибометрах типу «TRB<sup>3</sup>» [157].

Інформаційно-вимірювальний канал важільно-тензометричного методу вимірювання (strain-gauge method of friction force measurement) моменту тертя включає тонку металеву консольну балку, на якій змонтовано чотири активних тензорезистори, з'єднаних за схемою повного мосту Вітстона [158, 159]. Таке рішення дозволяє мінімізувати вплив температурного дрейфу опору та підвищити чутливість системи до мікродеформацій балки, що виникають під дією тангенціальної сили опору тертя.

Калібрування системи проводяться статичним методом («dead-weight calibration») [160]. Процес калібрування реалізовано за допомогою гнучкого зв'язку (капронової нитки), перекинutoї через прецизійний блок із мінімальним моментом інерції та опором ковзання. До нитки прикладається еталонне навантаження у вигляді набору стандартних гирьок масою від 0.05 до 0.3 г. Це дозволяє встановити лінійну залежність між вихідною напругою сенсора та прикладеною силою тертя, що є критично важливим для

дослідження антифрикційних матеріалів із низьким рівнем опору, таких як Zedex ZX-100K.

Для розширення динамічного діапазону вимірювань апаратна частина блоку управління має два режими чутливості (підсилення сигналу):

Режим №1 ( $\times 10$ ): призначений для випробування матеріалів із відносно високим коефіцієнтом тертя (поліаміди Sustamid 6, 66), де максимальне відхилення стрілки (або значення сигналу) відповідає навантаженню на тензобалку в 100 г; Режим №2 ( $\times 20$ ): використовується для прецизійних досліджень високоефективних полімерів (Sustadur GLD, Zedex ZX-324 V2T) та самозмащувальних систем, де максимальна шкала відповідає навантаженню у 200 г, що забезпечує вищу дискретність реєстрації даних.

Контроль кінематичних параметрів здійснюється шляхом моніторингу частоти обертання вала контр-тіла за допомогою датчика Холла [161]. Датчик реєструє проходження магнітних міток на валу, що приводиться в рух електродвигуном через ремінну передачу. Система дозволяє підтримувати стабільну кутову швидкість у діапазоні 20–800 об/хв, що в перерахунку на лінійну швидкість ковзання ( $v$ ) забезпечує можливість моделювання різних режимів тертя згідно з методиками ISO 7148-2:2012.

Оцінка інтенсивності зношування зразків проводиться гравіметричним методом [162]. Зважування полімерних блоків здійснюється до та після випробувань на аналітичних вагах із похибкою не більше 0.0001 г. Перед кожним зважуванням нові зразки очищувалися від можливих залишків після виготовлення та випадкових поверхневих забруднень, після чого витримувалися у контрольованих умовах температури й вологості для стабілізації маси.

Важливою складовою експериментальних досліджень є безперервний моніторинг температурного стану трибосистеми. Для реєстрації термічних процесів, що супроводжують тертя ковзання, у кожен із двох досліджуваних зразків (блоків) інтегровано по одному прецизійному платиновому терморезистивному датчику типу Pt100. Датчики розташовуються у приповерхневих шарах зразків у безпосередній близькості до зони контакту. Для забезпечення надійного теплового контакту та

мінімізації теплового опору між чутливими елементами Pt100 та матеріалом зразків при їх монтажі використовувалася високопровідна термопаста.

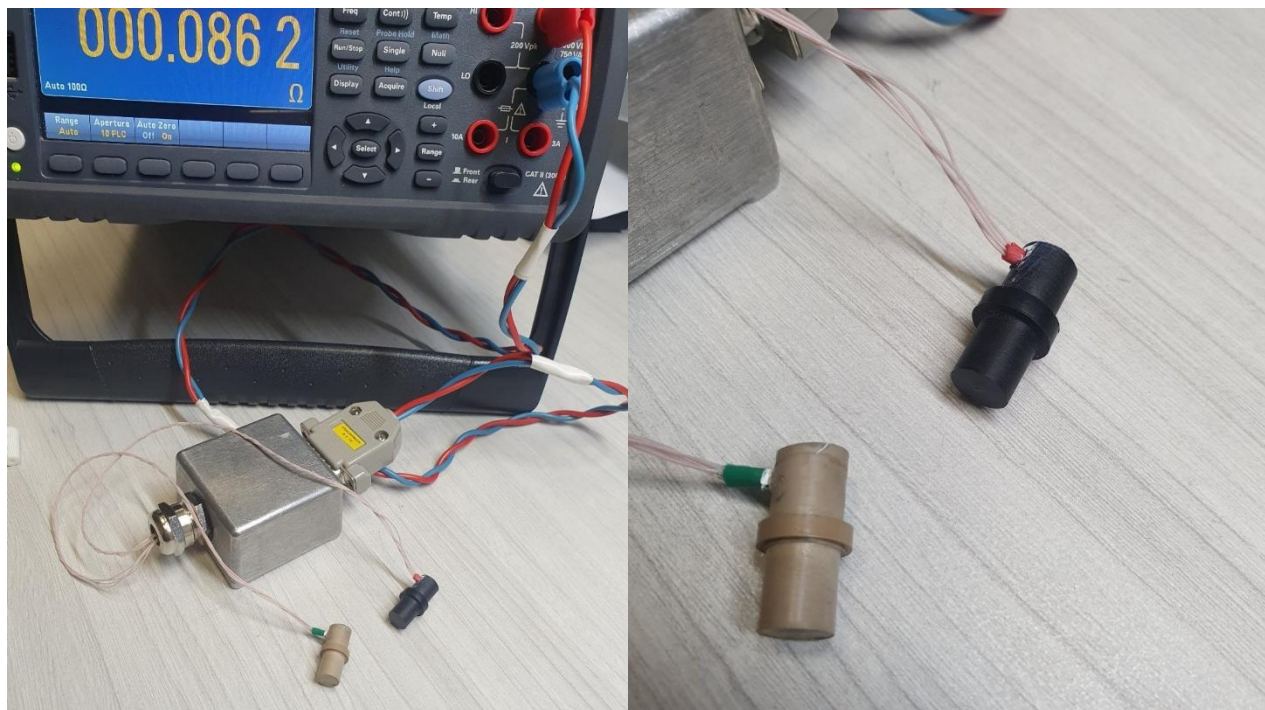


Рис.2.3. Загальний вигляд вимірювального комплексу для моніторингу термічної напруженості зразків.

Метрологічне забезпечення достовірності отриманих даних реалізовано шляхом прецизійного вимірювання активного опору датчиків за допомогою цифрового мультиметра високого класу точності. Попереднє калібрування вимірювального каналу дозволило врахувати індивідуальні характеристики терморезисторів та нівелювати вплив опору з'єднувальних ліній. Такий підхід забезпечив високу роздільну здатність при реєстрації найменших коливань температури та дозволив здійснювати коректний перерахунок електричного сигналу в реальні температурні показники з мінімальною інструментальною похибкою. Це дозволило з максимальною точністю та низькою інерційністю фіксувати динаміку тепловиділення, характерну для кожного конкретного матеріалу на різних етапах структурної адаптації.

Для забезпечення точності, що відповідає вимогам міжнародної температурної шкали ITS-90 (International Temperature Scale of 1990), обробка сигналів із датчиків здійснюється не за спрощеними лінійними схемами, а шляхом апроксимації залежності «опір–температура» поліномом шостого ступеня [163]. Це дозволяє нівелювати нелінійність характеристики платинового сенсора у широкому діапазоні температур (до +250.0°C).

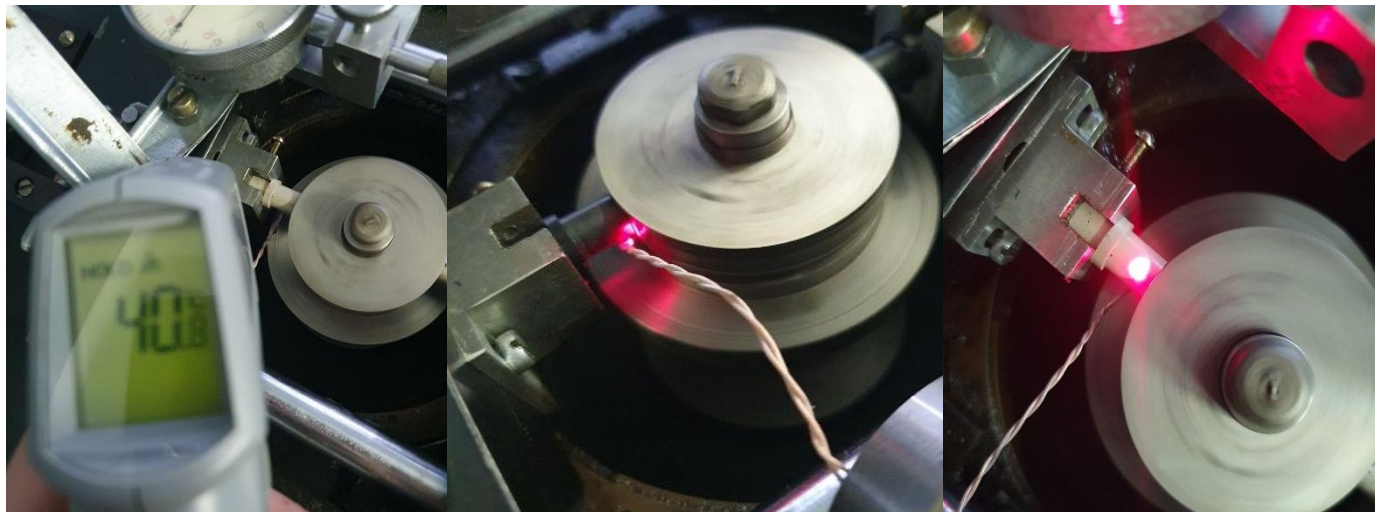


Рис. 2.4. Комбінований моніторинг температури в зоні тертя пірометричним та контактним методами

Перерахунок виміряного опору ( $R$ ) у значення температури ( $T$ ) проводиться за наступною функцією перетворення:

$$T = a_0 + a_1R + a_2R^2 + a_3R^3 + a_4R^4 + a_5R^5 + a_6R^6 \quad (2.1)$$

де  $a_n$  — коефіцієнти полінома, визначені під час калібрування системи відповідно до настанов щодо використання стандартних платинових термометрів опору (SPRT).

Такий підхід до термометрії забезпечує високу стабільність результатів та дозволяє проводити коректне порівняння термічної стійкості промислових термопластів (Sustapeek, Zedex) та експериментальних композитів.

Використання індивідуального датчика для кожного зразка в парі дозволяє контролювати рівномірність розподілу теплового навантаження між елементами

трибоспряження та забезпечує достовірність даних для подальшого аналізу структурної пристосованості матеріалів.

### 2.2.3 Технічні характеристики та кінематична схема експериментальної установки

Практична реалізація обраного методу випробувань здійснювалася на базі оригінальної трибометричної установки [164], конструкція якої базується на положеннях стандарту ISO 7148-2:2012. Кінематична схема машини розроблена для оцінки антифрикційних та протизношувальних властивостей полімерних композитів у широкому діапазоні навантажувально-швидкісних режимів, що дозволяє моделювати реальні умови експлуатації підшипників ковзання.

Основними конструктивними перевагами розробленої установки є можливість проведення експрес-тестування зразків спрощеної геометрії та забезпечення стабільності площі контакту в процесі ковзання. На відміну від традиційних схем, де лінійний знос призводить до прогресуючого збільшення поверхні взаємодії, у даній конструкції реалізовано принцип сталості контактних параметрів за рахунок специфічної геометрії трибоелементів.

Схема контактування (рис.2.5) передбачає взаємодію зразка з обертовим контр-тілом, де пляма контакту набуває форми еліпса з напіввісями  $a_e$  та  $b_e$  (відповідно радіусами  $r_1$  та  $r_2$ ).

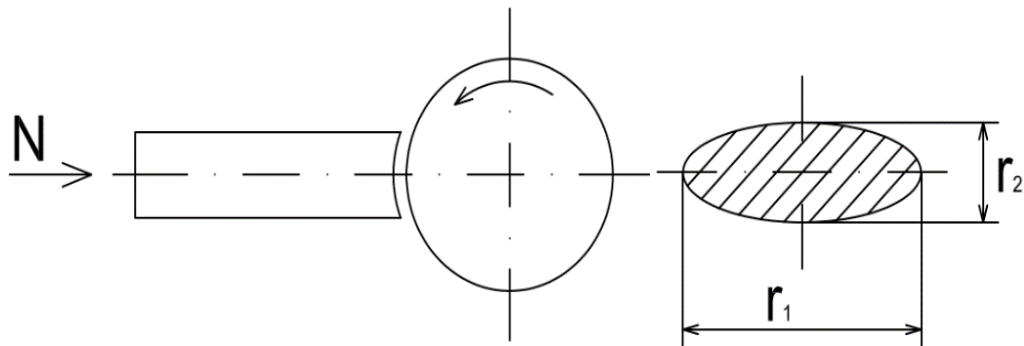


Рис. 2.5. Схема площі контакту об'єкту дослідження та контр-тіла

Математична модель розрахунку напружено-деформованого стану в зоні трибоконтaktu базується на визначенні максимального тиску  $p_{max}$ , який розраховується за формулою:

$$p_{max} = \frac{1.5N}{A} \quad (2.2)$$

де  $N$  — погонне навантаження, а  $A$  — фактична площа контакту, що визначається як:

$$A = \pi ab \quad (2.3)$$

Така геометрична адаптація дозволяє підтримувати постійність питомого тиску протягом усього циклу випробувань, що є критично важливим для дослідження кінетики структурної адаптації полімерних матриць.

$$\mu = \frac{2M}{Nr} \quad (2.4)$$

$M$  — вимірний момент тертя,  $r$  — радіус контакту.

Для забезпечення високої точності та відтворюваності значень нормального навантаження  $N$ , яке прикладається до пари тертя, було проведено попереднє тарування робочої пружини навантажувального пристрою. Метою цієї процедури є встановлення прецизійної залежності між деформацією пружини (стисненням) та величиною створюваного нею зусилля.

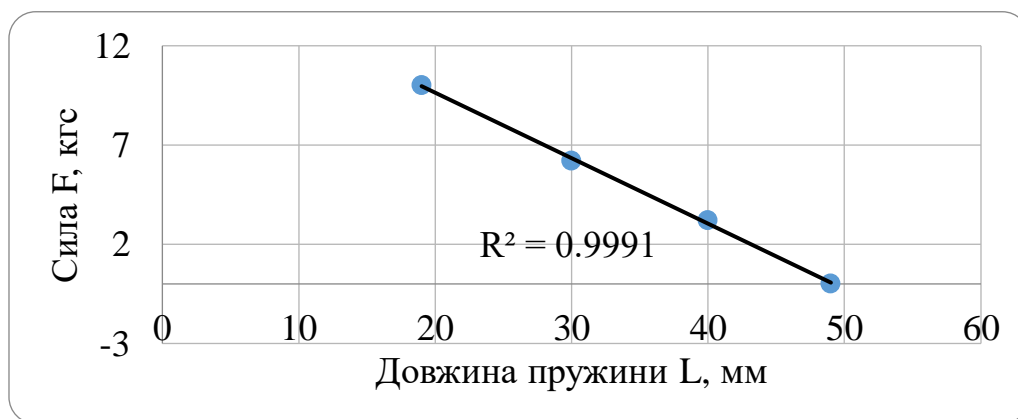


Рис. 2.6. Градувальна характеристика навантажувальної пружини трибометра

Процес тарування полягав у послідовному вимірюванні сили опору пружини при зміні її лінійної довжини. Отримані експериментальні дані (рис. 2.6) свідчать про

лінійність пружної деформації в робочому діапазоні довжин від 20 мм до 50 мм. Лінійна апроксимація отриманих результатів дозволила встановити тарувальний коефіцієнт з високим ступенем достовірності, про що свідчить значення коефіцієнта детермінації  $R^2 = 0,9991$ .

Використання отриманої математичної моделі дозволяє звести до мінімуму похибку задавання нормального тиску ( $P$ ) у зоні контакту, що є критично важливим для коректного розрахунку інтенсивності зношування та температурної напруженості трибосистеми.

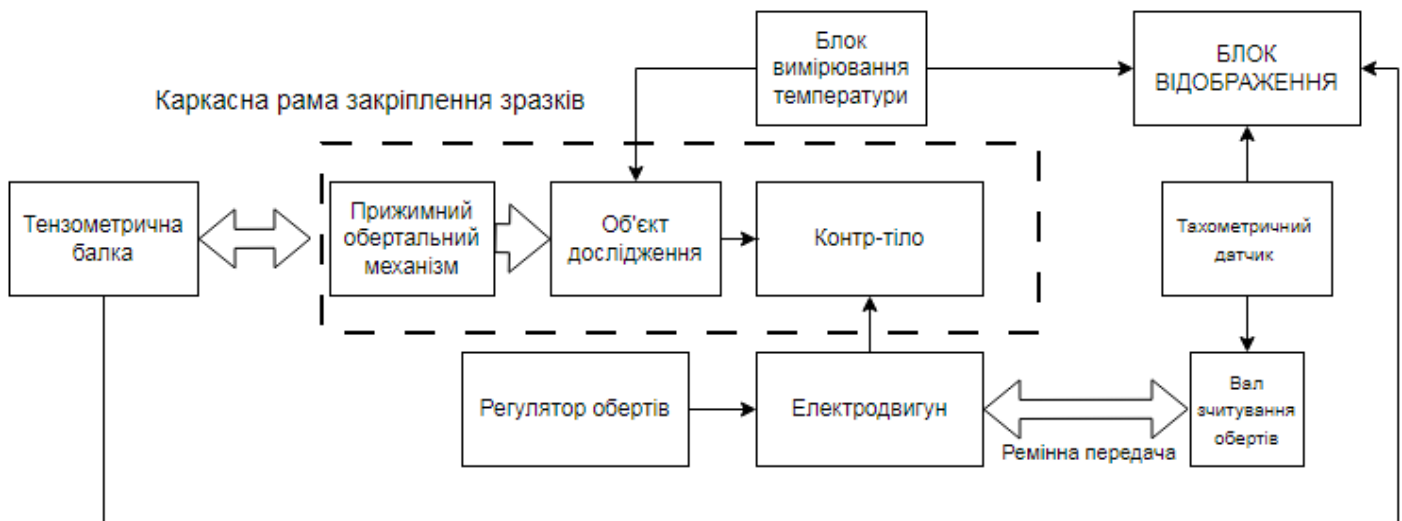


Рис. 2.7 Структурна схема дослідної установки.

Привід установки реалізовано за допомогою електродвигуна з можливістю регулювання швидкості обертання контртіла в діапазоні 20–800 об/хв. Передача крутного моменту на основний вал здійснюється через ремінну передачу, що знижує рівень вібрацій, які можуть впливати на точність вимірювань. Сила притискання зразка до контртіла регулюється пружним обертальним механізмом, інтегрованим у каркасну раму. Конструкція рами передбачає одночасне випробування двох зразків розміром  $8 \times 100$  мм, що забезпечує відтворюваність умов експерименту та підвищує статистичну достовірність отриманих результатів.

Для контролю робочих параметрів установка оснащена системою датчиків, метрологічні характеристики яких наведено у підрозділі 2.2.2. Швидкість обертання

контртіла реєструється за допомогою датчика Холла, а момент тертя визначається тензометричною балкою з двома режимами чутливості (максимальне відхилення відповідає навантаженню 100 г та 200 г).

Особливу увагу приділено температурному моніторингу. Окрім прецизійних датчиків Pt100, інтегрованих у тіло зразка, застосовувався додатковий контроль температури за допомогою інфрачервоного пірометра. Використання безконтактного методу забезпечило можливість оперативного виявлення локальних температурних градієнтів («гарячих точок») у зоні фрикційного контакту, виключаючи вплив теплової інерції контактних сенсорів. Такий комбінований підхід є принципово важливим для аналізу поведінки епоксидних матриць із різним вмістом графітового наповнювача, оскільки дозволяє оцінити ефективність тепловідведення від плями контакту.



Рис. 2.8 Загальний вигляд експериментальної трибометричної установки та блоку управління

Автоматизація процесу забезпечується блоком управління з прецизійним таймером (інтервал від 0.1 с до 999 хв), що дозволяє синхронізувати момент пуску установки з початком запису триботехнічних параметрів. Загальний вигляд експериментальної установки та блоку управління представлено на рис. 2.8.

## Висновки до розділу 2.

1. Обґрунтовано доцільність створення експериментальних композитів на основі реактопластичної матриці Epikote LR285, що, на відміну від стандартних термопластів, забезпечує високу розмірну стабільність та опір повзучості при інтенсивному фрикційному нагріві. Визначено оптимальні концентрації графітового наповнювача (8%, 15%, 20%), які дозволяють дослідити перехід системи до сталого режиму самозмащування та формування стійких вторинних структур у зоні контакту.

2. На основі критичного аналізу міжнародних стандартів (ISO 7148-2, ASTM G99/G77) доведено релевантність використання схеми випробувань «блок-на-кільці» (Method B). Встановлено, що дана конфігурація забезпечує найбільш адекватне моделювання роботи підшипників ковзання завдяки конформності контакту та ефективному відведенню надлишкової теплоти через сталеве контртіло (сталь 30ХГСА), що мінімізує ризик термічної деструкції полімерної матриці.

3. Розроблено та впроваджено прецизійну систему температурного моніторингу, яка базується на використанні платинових термоперетворювачів Pt100, інтегрованих безпосередньо в тіло зразка. Застосування чотирипровідної схеми підключення та математичне опрацювання сигналів за допомогою поліноміальних рівнянь ITS-90 (6-го порядку) дозволило досягти високої точності вимірювань, а використання безконтактного інфрачервоного пірометра забезпечило верифікацію температурних градієнтів у реальному часі.

4. Створено оригінальну трибометричну установку з автоматизованою системою збору даних, що дозволяє проводити комплексні випробування у широкому діапазоні швидкостей ковзання (1.4–5.5 м/с) та навантажень. Метрологічне підтвердження характеристик установки та калібрування засобів вимірювальної техніки в умовах лабораторії, акредитованої за стандартом ISO/IEC 17025, гарантує високу відтворюваність результатів та створює надійний базис для подальшого впровадження розроблених рішень у серійне виробництво.

5. Запропонована методика дослідження, що поєднує трибометричний контроль із подальшим аналізом зміни мікротвердості, дозволяє ідентифікувати механізми структурної адаптації матеріалів, що є ключовим для створення самозміцнювальних антифрикційних систем підшипникового призначення.

### РОЗДІЛ 3

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ПРОЦЕСІВ СТРУКТУРНОЇ АДАПТАЦІЇ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

Третій розділ дисертаційної роботи присвячений комплексному експериментальному дослідженню триботехнічних та фізико-механічних властивостей сучасних конструкційних полімерів, що становлять науковий та практичний інтерес для вузлів тертя галузевого машинобудування. Методологічна база досліджень ґрунтується на системному підході, який передбачає одночасний аналіз макроскопічних параметрів зношування та мікроструктурних трансформацій поверхневих шарів у процесі фрикційної взаємодії. Основним завданням даного етапу роботи є встановлення взаємозв'язків між режимами навантаження, температурною напруженістю контакту та здатністю полімерних матриць до структурної адаптації, що є критично важливим для забезпечення довговічності металополімерних підшипників ковзання в умовах сухого тертя.

Об'єктами дослідження обрано широкий спектр інженерних термопластів, включаючи напівкристалічні поліаміди, аморфні полієфіріміди та багатокomпонентні композиції типу Zedex. На початковому етапі досліджень було проведено серію скринінгових випробувань широкого переліку полімерних матриць, зокрема Sustamid 6, Sustapei, Sustamid 6G OL, Sustapeek GF30, Sustadur GLD, Sustamid 66 та Sustadur PET, з метою оцінки їхньої базової працездатності. За результатами первинної оцінки частину зазначених матеріалів було виключено з подальшого поглибленого аналізу через виражену схильність до термічної деградації та втрату структурної цілісності в зонах фрикційного контакту, що дозволило змінити науковий фокус на найбільш трибологічно стабільні та адаптивні зразки. Враховуючи специфіку в'язкопружної поведінки полімерів, для реєстрації фізичних параметрів залучено прецизійні засоби безконтактного контролю, такі як інфрачервона пірометрія та лазерна скануюча профілометрія. Такий підхід дозволив мінімізувати систематичні похибки, пов'язані з

механічним впливом вимірювальних інструментів на м'яку полімерну матрицю, та забезпечити метрологічну достовірність результатів згідно зі стандартами акредитованих лабораторій.

Логіка викладу матеріалу в розділі побудована за принципом від загальних триботехнічних характеристик до глибокого аналізу морфології поверхні. Перша частина присвячена вивченню кінетики вагового зносу та температурних полів, що дозволяє ідентифікувати енергоефективні режими роботи для різних класів полімерів. Наступний етап дослідження спрямований на детальну оцінку мікрогеометрії поверхонь тертя за допомогою апарату кривих Аббота-Файєрстоуна. Це дало змогу кількісно описати розвиток несучої здатності мікрорельєфу та визначити діапазони швидкостей ковзання, за яких спостерігається найвищий рівень пластичної адаптації та самозмашування.

Завершальний блок розділу фокусується на дослідженні мікротвердості полімерів як інтегрального показника структурних змін у зоні контакту. Шляхом порівняння характеристик вихідних та відпрацьованих поверхонь встановлено закономірності зміцнення або деградації матеріалів під впливом термомеханічних чинників. Синтез отриманих експериментальних даних щодо інтенсивності зношування, шорсткості та твердості дозволяє не лише обґрунтувати вибір оптимальних матеріалів для трибосистем, але й сформувати емпіричну базу для подальшої розробки високонавантажених композитів із прогнозованим ресурсом роботи.

### **3.1. Кінетика зношування та антифрикційні властивості досліджуваних матеріалів за різних навантажувально-швидкісних режимів.**

В експериментальній частині дослідження обрано конструкційні полімери, що широко застосовуються у вузлах ковзання в галузевому машинобудуванні, фармацевтичній та харчовій промисловості: Sustamid 66 (PA66), Sustapei (PEI) та SusTamid 6G OL (PA6, oil-filled). Вибір цих матеріалів обґрунтований їхніми фізико-механічними та трибологічними характеристиками: напівкристалічний PA66 —

як еталон з високою механічною міцністю і зносостійкістю; аморфний PEI — для оцінки поведінки при підвищених температурах; капролон з внутрішнім мастилом — для вивчення ефектів самозмащування та впливу наповнювача на механізми зносу.

Таблиця 3.1

### Фізичні властивості досліджуваних полімерних матеріалів

Властивості	Метод тестування	Одиниці	Sustamid 66 сірий	Sustapei	SusTamid 6G OL
Щільність	DIN EN ISO 1183-1	г/см <sup>3</sup>	1.15	1.27	1.14
Абсорбція води	DIN EN ISO 62	%	2.8	0.5	2.0
Межа текучості	DIN EN ISO 527	МПа	85	110	70
Модуль пружності	DIN EN ISO 527	МПа	3300	3100	3300
Твердість за Шором	DIN EN ISO 868	шкала D	83	86	82
Температура плавлення	ISO 11357-3	°C	260	248	213
Теплопровідність	DIN 52612-1	Вт/мК	0.23	0.24	0.25

Контртіло виготовлено зі сталі 30ХГСА з обробленою поверхнею  $Ra = 0,37$  мкм та твердістю  $HRC = 43$ . Така комбінація матеріалу та параметрів поверхні дозволяє відтворити реальні умови пари «вал — полімерна втулка», при яких металевий компонент залишається жорстким і мало піддається пластичній деформації, а основна відповідальність за адаптацію та знос лежить на полімерному елементі. Це підвищує прикладну значущість результатів і дозволяє сфокусувати дослідження на механізмах структурної адаптації полімерів. Для встановлення стабільного контактного режиму

перед кожним тестом здійснювали попереднє притирання зразків протягом 15 хвилин. Після цього реєстрували основні параметри трибологічного процесу; середня швидкість ковзання в експериментах становила 2.82–2.87 м/с. Така процедура дозволяє зменшити початкові перехідні ефекти і підвищити відтворюваність результатів.

Аналіз отриманих даних дозволив встановити чітку кореляцію між моментом тертя, інтенсивністю тепловиділення та ваговим зносом матеріалів.

Таблиця 3.2

### Результати трибометричних досліджень

Зразки 1-й та 2-й	Початкова вага $m_1$ (г)	Кінцева вага $m_2$ (г)	Ваговий знос $m_{\Delta}$ (г)	Середня швидкість ковзання $\bar{v}$ (м/с)	Момент тертя (Н*м)
Sustamid 66 сірий	0.9801	0.9692	0.0109	2.84	1.54
	1.0295	1.0183	0.0112		
Sustapei	0.9915	0.9778	0.0137	2.82	1.61
	1.001	0.9869	0.0141		
SusTamid 6G OL	1.2999	1.2862	0.0137	2.87	1.27
	1.1557	1.1437	0.0120		

Оцінка гравіметричних показників зношування продемонструвала високу зносостійкість усіх обраних матеріалів за заданих умов ковзання. Середнє значення вагового зносу для всієї вибірки склало 0.0126 г при середньоквадратичному відхиленні 0.0013 г, що підтверджує стабільність процесу руйнування поверхневих шарів. Найнижчий показник втрати маси (0.0110 г) зафіксовано для поліаміду Sustamid 66, що корелює з його високою твердістю та здатністю до утворення міцних адгезійних зв'язків. Водночас матеріал SusTamid 6G OL, попри дещо вищий ваговий знос (0.0128 г), продемонстрував найнижче значення моменту тертя — 1.27 Н·м. Такий результат безпосередньо зумовлений наявністю внутрішнього змащувального компонента

(мастила), який у процесі тертя виділяється в зону контакту, реалізуючи механізм самозмащування та суттєво знижуючи енергетичні витрати на подолання сил тертя.

Кінетика теплових процесів, зафіксована за допомогою комплексної системи термометрії, виступила ключовим індикатором інтенсивності трибохімічних явищ та здатності матеріалів до структурної адаптації. Використання комбінованого методу — безконтактної пірометрії для моніторингу поверхні контртіла та терморезистивних перетворювачів Pt100, інтегрованих у тіло зразка, — дозволило з високою точністю верифікувати теплові потоки. Зокрема, опрацювання сигналів за алгоритмами ITS-90 забезпечило достовірність температурних профілів навіть в умовах інтенсивного динамічного нагріву.

Встановлено, що для модифікованого литого поліаміду SusTamid 6G OL характерним є найбільш енергоефективний та сприятливий тепловий режим. Завдяки наявності інтегрованих мастильних компонентів, температура зразків за даними датчиків Pt100 стабілізувалася на позначці близько  $55^{\circ}\text{C}$ , що корелювало з показниками пірометрії контртіла ( $60^{\circ}\text{C}$ ). Така стабільність свідчить про формування стійких вторинних структур, які мінімізують роботу сил тертя та запобігають термічній деструкції матриці.

На противагу цьому, аморфний полієфірімід Sustapei продемонстрував екстремальне теплове навантаження. За ідентичний часовий інтервал (70 хв) при моменті тертя  $1.61\text{Н}\times\text{м}$  температура металевого контртіла сягнула  $135^{\circ}\text{C}$ . Контрольні заміри температури всередині зразка підтвердили критичний градієнт нагріву, що свідчить про високу схильність PEI до механо-термічної активації.

Отримані результати свідчать про критичну чутливість аморфних полімерів до локальних теплових навантажень, що обмежує їх застосування у високонавантажених трибосистемах. Водночас зафіксовані градієнти нагріву підтверджують необхідність цілеспрямованої модифікації матриці для забезпечення термостабільності та довговічності матеріалу

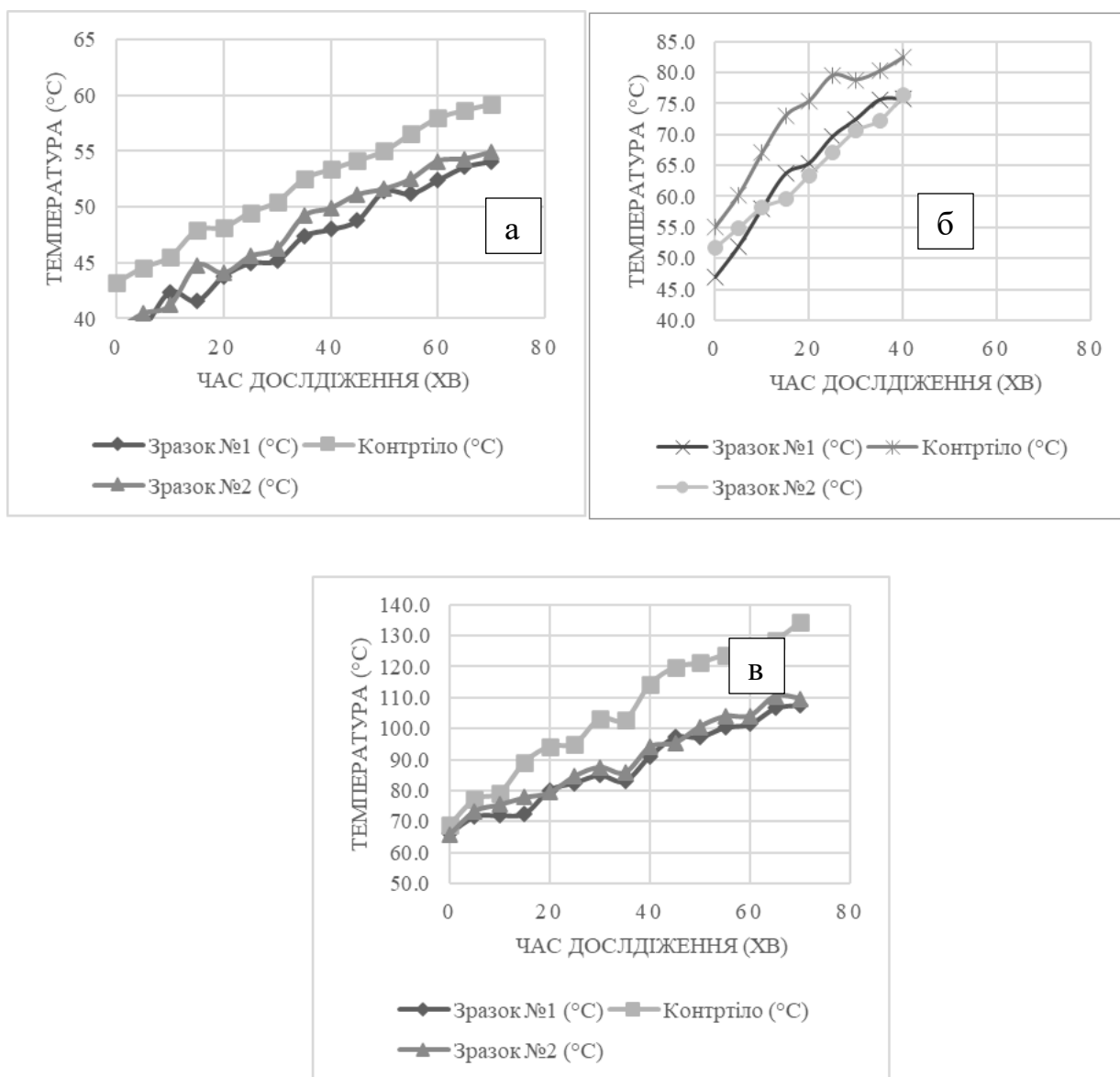


Рис. 3.1. Моніторинг температури об'єктів дослідження : а – Sustamid 6G OL, б – Sustamid 66, в – Sustapei.

Така інтенсивна дисипація енергії у парі з Sustapei створює ризик перевищення температури склування матеріалу, що неминуче призводить до втрати його несучої здатності та зниження експлуатаційної надійності. Морфологічний аналіз поверхонь тертя після завершення експериментів підтвердив відсутність ознак макроскопічної термічної деструкції, обуглювання або зміни оптичних властивостей (кольору та прозорості) полімерів. На робочих поверхнях спостерігалися лінійні подряпини та

мікропотертості, орієнтовані в напрямку ковзання, що є типовою ознакою адгезійно-деформаційного механізму зношування.

Додатково встановлено, що характер мікропошкоджень має локалізований характер і не супроводжується утворенням тріщин чи відшарувань, що свідчить про достатню пластичність полімерної матриці. Це узгоджується з даними щодо стабільності температурних режимів у зоні контакту, які не перевищували критичних значень для даного класу матеріалів. Таким чином, навіть за умов інтенсивного фрикційного навантаження Sustapei демонструє здатність до часткової адаптації поверхні, що проявляється у формуванні вторинних структур перенесення та стабілізації процесу зношування. Отримані результати підтверджують перспективність використання цього матеріалу у вузлах тертя, де важливим є баланс між високою жорсткістю та термостійкістю

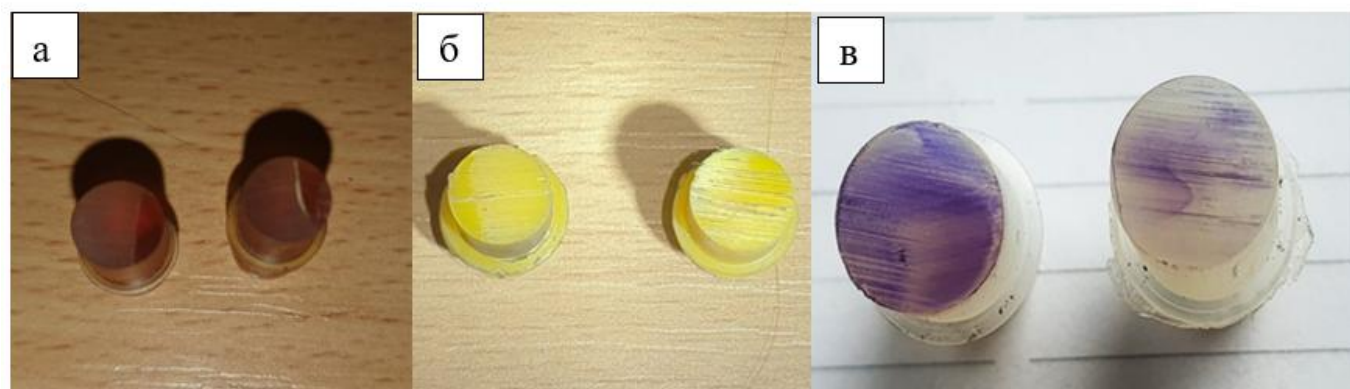


Рис. 3.2. Зовнішній вигляд зразків після триботестування: а — Sustapei; б — Sustamid 6G OL; в — Sustamid 66

Для поліамідних груп (Sustamid 66 та 6G OL) зафіксовано ознаки перенесення тонких шарів полімеру на сталеву поверхню контртіла з формуванням вторинних трибоструктур. Це свідчить про протікання інтенсивних фізико-хімічних процесів, які сприяють ефекту самозмащування твердих тіл, що є критично важливим для експлуатації трибосистем у сухому режимі без додаткового підведення мастильних матеріалів. Таким чином, отримані результати дозволяють позитивно оцінити

перспективність використання досліджуваних полімерів у парах тертя галузевого машинобудування за умови врахування теплової напруженості конкретного вузла.

Аналіз експериментальних даних показав, що низький рівень водопоглинання Sustapei (приблизно 0,5 % за ISO 62) у поєднанні з найвищою межею текучості серед досліджуваних зразків (110 МПа) визначає підвищену жорсткість матеріалу. За умов сухого тертя це призводить до значного фрикційного розігріву контактної зони з максимальними температурами до 135 °С. Для SusTamid 6G OL характерна капілярна структура, модифікована мастилом, яка забезпечує формування граничного режиму тертя навіть без додаткового підведення мастильного матеріалу, що зменшує локальний нагрів і інтенсивність зношування.

Для оцінки статистичної достовірності результати вимірювань оброблялися попарно з розрахунком середньоквадратичного відхилення; отримане значення СКВ (0,0013) свідчить про високу повторюваність умов експерименту та стабільність властивостей досліджуваних партій полімерів виробництва Röchling Group. Це дозволяє вважати зафіксовані відмінності у зносі між Sustamid 66 та Sustapei статистично значущими, а не наслідком випадкових похибок вимірювання.

Візуальний аналіз поверхонь (Рис. 3.2.) та динаміка моменту тертя вказують на формування на сталевому контртілі вторинних структур у вигляді полімерних плівок перенесення. Для матеріалів Sustamid 66 та 6G OL товщина і стабільність цих плівок забезпечують перехід від контакту «полімер–метал» до контакту «полімер–полімерна плівка», що пояснює стабілізацію моменту тертя після завершення періоду припрацювання. Відсутність ознак термічної деструкції та газовиділення при температурах до 100–110 °С для Sustamid 66 і 6G OL підтверджує їхню придатність для застосування у вузлах тертя фармацевтичного обладнання, де висуваються підвищені вимоги до чистоти робочих зон і відсутності забруднюючих аерозолів.

### 3.2. Аналіз мікрогеометрії та еволюція морфології поверхонь тертя.

Експериментальні дослідження проводилися для антифрикційного полімерного матеріалу Zedex zx-100k (ТМ ZEDEX), що являє собою композицію на основі полієфірміду (PEI), полієфірефіркетону (PEEK) та поліетилентерефталату (PET). Завдяки кристалічній однорідній структурі зазначений пластик характеризується високою еластичністю та зносостійкістю, що за певних умов експлуатації перевершує показники фторопласту. Метою серії експериментів на машині тертя було вивчення впливу швидкості ковзання на мікрорельєф та зносостійкість полімеру в умовах, наближених до реальних експлуатаційних режимів. Випробування здійснювали при трьох фіксованих швидкостях: 1.4, 2.8 та 5.5 м/с, використовуючи одну пару зразків як контрольну для подальшого порівняльного аналізу змін шорсткості поверхонь. Кожен режим тестування тривав 75 хвилин, після чого виконувався детальний аналіз топографії для виявлення закономірностей зношування та структурних трансформацій поверхневого шару.

Як матеріал контртіла було обрано сталь 30ХГСА з твердістю HRC 43 та вихідною шорсткістю Ra 0.37 мкм. Зазначена сталь відрізняється високою міцністю та корозійною стійкістю завдяки легуванню хромом, марганцем і кремнієм, що забезпечує стабільність трибосистеми в агресивних середовищах. Для кількісної оцінки мікрогеометрії використовували лазерний скануючий диференційно-фазовий мікроскоп-профілометр, який дозволяє отримувати тривимірні профілі поверхонь. Сканування проводилося в межах квадратної ділянки розміром 256 мкм × 256 мкм, що є оптимальним для деталізації мікроструктури. Параметри мікрорельєфу визначалися відповідно до міжнародного стандарту DIN 4776, який охоплює показники шорсткості критичні для оцінки несучої здатності контакту. Для забезпечення точності зразки піддавалися ретельному очищенню, а процес сканування виконувався поетапно для досягнення високого ступеня відтворюваності результатів.

Результати проведених досліджень дозволили візуалізувати динаміку змін робочих зон, що відображають зображення мікрорельєфу поверхні зразків полімеру при

різних швидкостях ковзання. (Рис. 3.3.). На контрольних зразках, що не піддавалися трибологічному впливу, чітко спостерігаються сліди механічної обробки, характерні для процесу виготовлення.

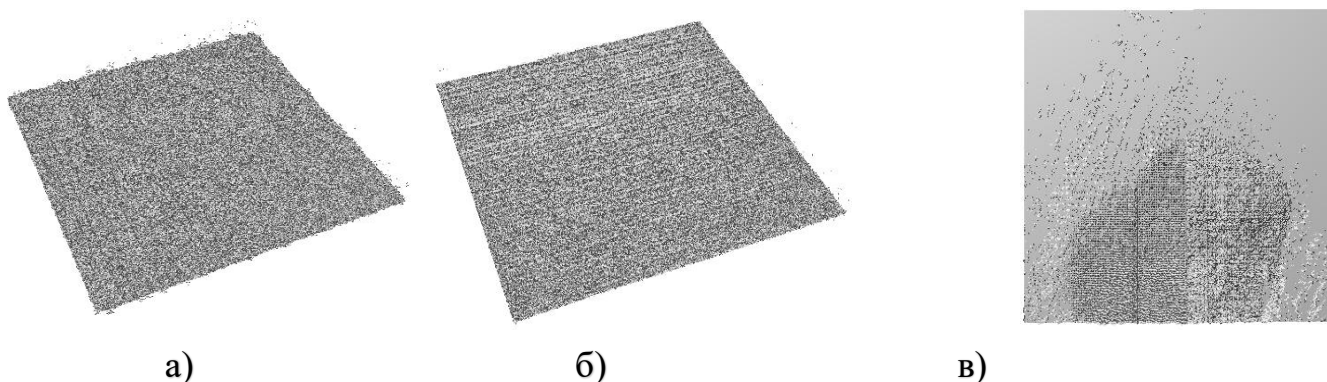


Рис. 3.3. Тривимірні мікрофотографії поверхонь зразків : а- контрольний зразок, б – нормальний режим (2.8 м/с) , в- високошвидкісний режим (5.5 м/с).

При роботі в режимі швидкості 2.8 м/с, який визначено як оптимальний, фіксується формування якісної робочої поверхні, де мікронерівності згладжуються внаслідок мікропластичної деформації та прояву ефекту самозмащування пари тертя. Така рівномірна топографія з мінімальною кількістю дефектів сприяє стабілізації моменту тертя та підвищенню довговічності вузла. Водночас перехід до високошвидкісного режиму (5.5 м/с) призводить до суттєвої деградації поверхні, що проявляється у формі локальних оплавлень, вирв та значних деформацій, спричинених інтенсивним тепловиділенням у зоні контакту.

Комплексна оцінка мікрорельєфу поверхні полімеру на основі кількісних параметрів шорсткості підтверджує виявлені візуальні тенденції. Зокрема, значення максимальної висоти профілю  $R_{\max}$  для контрольного зразка становило 0.35 мкм. При швидкості ковзання 1.4 м/с цей показник знизився до 0.13 мкм, що вказує на ефективне згладжування піків у результаті мікропластичної адаптації в трибоконтаті. Найменше значення  $R_{\max}$  (0.1 мкм) було досягнуто при швидкості 2.8 м/с, що свідчить про створення максимально гладкого інтерфейсу завдяки оптимальній змащувальній дії полімеру. Аналогічна динаміка простежується і для середнього арифметичного

відхилення профілю  $R_a$ : від початкових 0.015 мкм шорсткість зменшується до 0.006 мкм (при 1.4 м/с) та сягає мінімуму 0.003 мкм у зоні стабільної роботи. Проте подальше зростання швидкості до 5.5 м/с ініціює термічний знос, внаслідок чого  $R_{max}$  збільшується до 0.25 мкм, а  $R_a$  зростає до 0.008 мкм, що сигналізує про погіршення якості поверхневого шару через оплавлення.

Таблиця 3.3

### Функціональні параметри профілю шорсткості мікрорельєфу поверхні

Параметри профілю шорсткості поверхні	Zedex Контрольний	Zedex 200 м/с	Zedex 400 м/с	Zedex 800 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
$Mr1$ – співвідношення матеріалу, що визначає верхню межу шорсткості серцевини,	25	12.9	10.6	19.4
$Mr2$ – 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

Важливим етапом дослідження став аналіз функціональних властивостей поверхні за допомогою кривої Аббота-Файєрстоуна (опорної кривої профілю), яка моделює процес зношування, надаючи інтегральну інформацію про розподіл матеріалу по висоті профілю та об'єм пустот топографії. Застосування даного методу дозволило кількісно оцінити несучу здатність поверхні та її спроможність до утримання продуктів зносу або мікроплівок самозмашування в зоні контакту. Кількісним критерієм оцінки виступав параметр центральної частини середньої відносної опорної довжини профілю, який безпосередньо відображає частку площі, що сприймає контактне навантаження. Для контрольного зразка у вихідному стані після механічної обробки значення цього параметру становило 47%, що характеризує початкову топографію з вираженими піками нерівностей та відносно низькою площею фактичного контакту.

Порівняно з вихідним станом, таке суттєве зростання вказує на формування розвиненого «плато» мікрорельєфу, яке забезпечує максимальну стабільність контакту, рівномірний розподіл питомих тисків та мінімізацію локальних напружень.

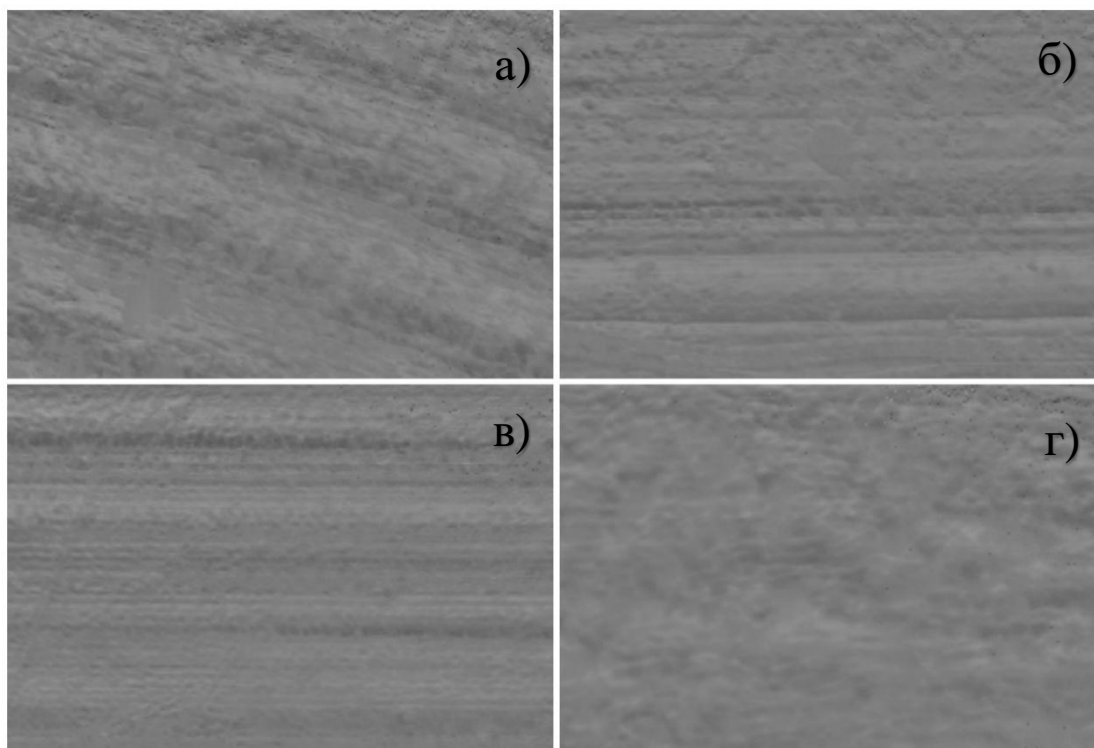


Рис. 3.4. Зображення мікрорельєфу поверхні зразків полімеру при різних швидкостях ковзання: *а*- контрольний зразок, *б*- 1.4 м/с, *в*- 2.8 м/с та *г*- 5.5 м/с.

Динаміка зміни опорної здатності при різних режимах експлуатації виявила чітку залежність між швидкістю ковзання та якістю сформованої робочої поверхні. При швидкості 1.4 м/с зафіксовано зростання показника до 59%, що свідчить про початкову стадію припрацювання та згладжування найбільш гострих вершин профілю. Найбільш сприятливі умови для функціонування трибосистеми було досягнуто при швидкості 2.8 м/с, де значення опорної довжини сягнуло свого максимуму — 71%. Порівняно з вихідним станом, таке суттєве зростання вказує на формування розвиненого «плато» мікрорельєфу, яке забезпечує максимальну стабільність контакту, рівномірний розподіл питомих тисків та мінімізацію локальних напружень. Саме за таких умов матеріал Zedex zx-100k демонструє найкращі антифрикційні властивості завдяки оптимальному поєднанню пластичної адаптації та самозмащування.

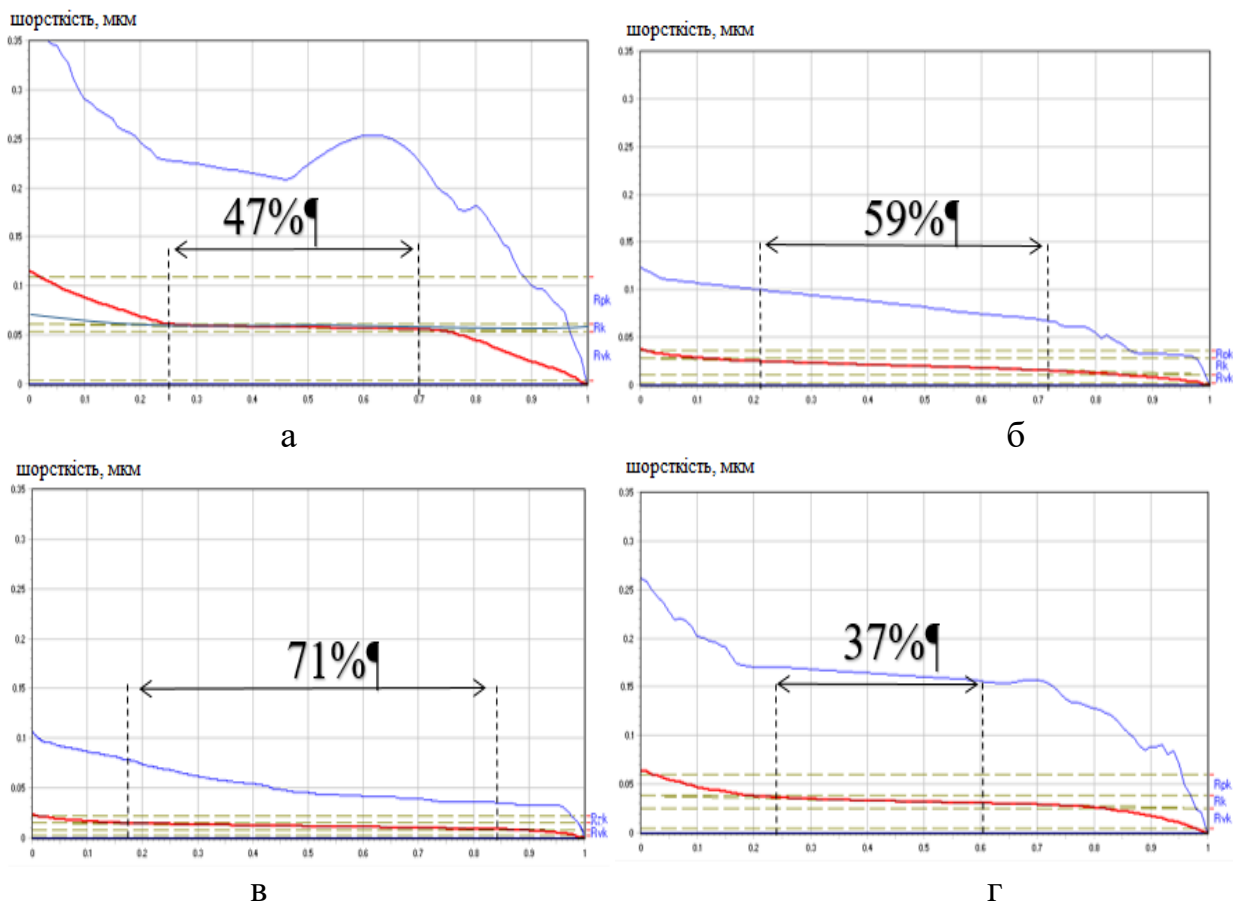


Рис. 3.5. Оцінка мікрорельєфу поверхні полімеру Zedex zx-100k: а- контрольний зразок, поверхня після тертя при швидкості ковзання 1.4 м/с (б), 2.8 м/с (в) та 5.5 м/с (г).

Однак подальше підвищення швидкості ковзання до 5,5 м/с призвело до різкої деградації функціональних характеристик поверхні, внаслідок чого опорна здатність скоротилася до 37%. Порівняльний аналіз результатів демонструє, що при переході від оптимального до високошвидкісного режиму ефективна площа контакту зменшується майже вдвічі, стаючи навіть нижчою за показники контрольного зразка. Таке критичне падіння є прямим наслідком інтенсивної теплової деструкції та виривання фрагментів полімеру, що призводить до руйнування несучого профілю та ініціює перехід до катастрофічного зношування. Отримана закономірність підтверджує, що для забезпечення довговічності вузла тертя швидкісний режим повинен бути обмежений порогом, за яким мікрогеометрія втрачає свою здатність ефективно розподіляти механічне навантаження.

Узагальнюючи отримані дані, можна стверджувати, що мікрогеометрія поверхні полімеру Zedex zx-100k критично залежить від швидкісного режиму експлуатації. Вибір оптимальних умов роботи (в околі 2.8 м/с) дозволяє повною мірою реалізувати потенціал пластичності та самозмашувальних властивостей матеріалу, забезпечуючи найвищий рівень згладжування мікронерівностей та максимальну несучу здатність контакту. Натомість робота при надмірних швидкостях призводить до термічного перевантаження, що супроводжується зростанням шорсткості та втратою функціональних характеристик поверхні. Отримані результати підкреслюють важливість прецизійного підбору режимів роботи для забезпечення довговічності полімерних підшипників ковзання в системах сухого тертя.

### **3.3. Дослідження мікротвердості та оцінка структурної адаптації поверхонь полімерів за фрикційної взаємодії**

Оцінка фізико-механічного стану поверхневих шарів полімерних матеріалів проводилася шляхом дослідження їхньої мікротвердості, що визначається як здатність матеріалу чинити опір локальній деформації під дією індентування. У межах даного етапу було проаналізовано поведінку широкого спектра конструкційних полімерів

виробництва, зокрема Sustamid 6G OL, Sustamid 66, Sustadur PET, Sustapeek GF30, Sustamid 6, Sustapei та Sustadur GLD, а також антифрикційного матеріалу Zedex zx-100k. Основним завданням було встановлення закономірностей зміни мікротвердості в зоні доріжки тертя порівняно з вихідним станом, що дозволяє оцінити здатність матеріалу до структурної адаптації або схильність до деградації в умовах зношування.

Методика вимірювань базувалася на використанні мікротвердоміра ПМТ-3, оснащеного чотиригранною алмазною пірамідою Віккерса з кутом при вершині  $136^\circ$  [165]. Для забезпечення достовірності результатів та мінімізації впливу в'язкопружної повзучості навантаження на індентор було стандартизоване на рівні 0.39 Н для всіх типів досліджуваних зразків. Перед скануванням поверхні проходили ретельну підготовку в лабораторних умовах, що включала очищення та знежирення для виключення впливу сторонніх часток на точність вдавнення. Особливість тестування полімерів полягала у врахуванні фактора часового відновлення відбитка, тому вимірювання діагоналей проводилися через чітко визначений інтервал часу після зняття навантаження, що відповідає кращим практикам роботи з полімерними матрицями [166].

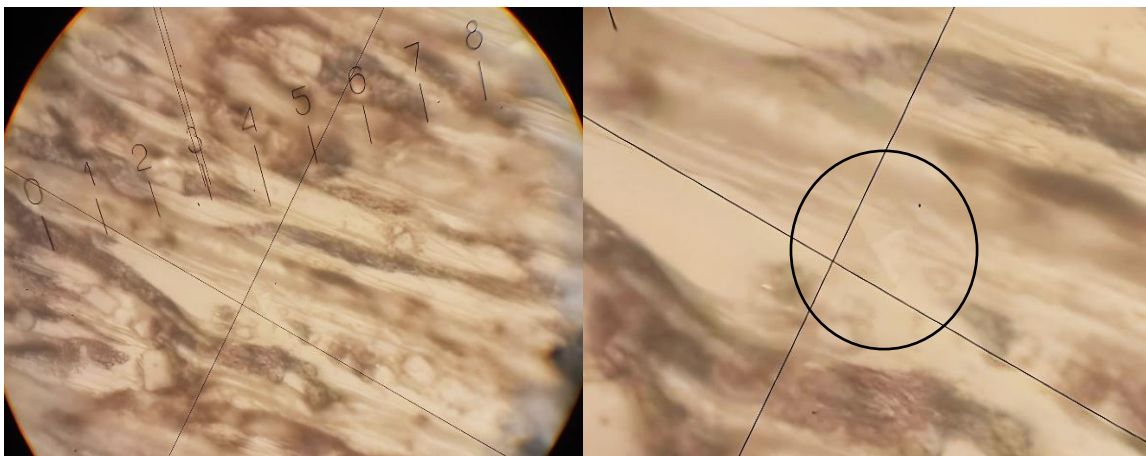


Рис. 3.6. Зображення відбитка мікротвердоміра на поверхні матеріалу Sustapeek GF30

На мікрофотографії рис. 3.6. представлено відбиток алмазного індентора Віккерса, отриманий у процесі визначення мікротвердості композиційного матеріалу Sustapeek GF30 за допомогою приладу ПМТ-3. Відбиток має характерну пірамідальну форму з

чітко окресленими діагоналями, що підтверджує дотримання регламентованих умов індентування та стабільність роботи навантажувальної системи. Морфологія відбитка демонструє низку особливостей, які відображають специфіку композитної структури. Зокрема, у місцях контакту індентора з полімерною матрицею, спостерігаються локальні спотворення контурів, що зумовлює варіації опору вдавненню та потребує проведення серії вимірювань для отримання статистично достовірного середнього значення мікротвердості. Водночас візуалізація відбитка свідчить про наявність в'язкопружної релаксації, властивої поліефіркетонівій основі: після зняття навантаження краї відбитка частково «затягуються», що може призводити до заниження вимірних діагоналей і повинно враховуватися при прецизійному визначенні числа твердості.

Навколо периметра відбитка не виявлено макроскопічних тріщин чи відколів, що підтверджує високу когезійну міцність зв'язку полімерної матриці, а також значну в'язкість руйнування матеріалу навіть за умов локального механічного навантаження. Таким чином, отримане зображення є об'єктивним підтвердженням структурної цілісності матеріалу Sustapeek GF30, демонструє коректність проведення індентування та слугує базою для подальшого кількісного аналізу, зокрема для розрахунку градієнта мікротвердості в зонах фрикційного впливу й оцінки ролі армуючої фази у формуванні локальних механічних характеристик матеріалу.

Аналіз отриманих експериментальних даних засвідчив суттєві відмінності у реакції полімерних матеріалів на триботехнічне навантаження при швидкості ковзання 2.8 м/с. Для більшості представників групи Sustamid було зафіксовано явище знеміцнення, що проявлялося у негативному відхиленні мікротвердості та свідчило про домінування процесів деструкції над процесами структурного впорядкування. Найбільш виражене зниження твердості спостерігалось у поліаміду Sustamid 6, де відхилення склало  $-1296,8$  одиниць, що є індикатором інтенсивного руйнування молекулярних зв'язків та зниження когезійної міцності поверхневого шару під дією тертя. Така поведінка демонструє вразливість поліамідної матриці до локальних механічних і термічних навантажень, а також обмеженість її здатності до самостабілізації структури.

На противагу цьому матеріал Zedex zx-100k продемонстрував найвищу стабільність показників мікротвердості, що дозволило обрати його для поглибленого дослідження впливу швидкості ковзання у діапазоні від 1.4 до 5.5 м/с. Відмінність зумовлена природою структурних механізмів: якщо у поліамідів переважає деструкція молекулярних зв'язків, то у Zedex-100k нагрів стимулює вторинну кристалізацію. Це формує впорядковану морфологію та ефект фрикційного зміцнення (аналог наклепу), що домінує над термічним розм'якшенням і забезпечує зростання мікротвердості поверхні. Для поліамідів перші два чинники мають руйнівний характер, тоді як для Zedex zx-100k третій механізм відіграє визначальну роль, забезпечуючи стабільність і навіть потенційне підвищення мікротвердості.

Таблиця 3.4

### Структурна адаптація та ваговий знос полімерних матеріалів

Матеріал	Мікротвердість $H_{40}$ (МПа)				Ваговий знос (г)
	Вихідна поверхня	Доріжка тертя	$\Delta H$		$\Delta m$
Sustamid 6	1830.1	533.3	1296.8	знеміцнення	0.3147
Sustapei	996.5	337.7	658.8	знеміцнення	0.1800
Sustamid 6G OL	1313.6	1037.9	275.7	знеміцнення	0.1996
Sustapeek GF30	738.9	500.3	238.6	знеміцнення	0.1232
Sustadur GLD	658.8	569.7	89.2	знеміцнення	0.0836
Sustamid 66	398.9	328.4	70.4	знеміцнення	0.1178
Sustadur PET	260.6	798.8	538.2	зміцнення	0.0458
Zedex zx-100k (№1)	158.4	214.1	55.7	зміцнення	0.0354
Zedex zx-100k (№2)	158.4	293.5	135.0	зміцнення	0.0184
Zedex zx-100k (№3)	158.4	305.4	147.0	зміцнення	0.0094

Аналіз експериментальних даних засвідчив суттєві відмінності у поведінці досліджуваних полімерних систем під дією фрикційних навантажень. Виявлені

контрастні тенденції дозволяють окреслити ключові фактори, що визначають їхню довговічність та функціональну придатність

Отже, результати дослідження демонструють принципове протиставлення між матеріалами: поліаміди групи Sustamid характеризуються схильністю до знеміцнення під дією тертя, тоді як Zedex zx-100k проявляє здатність до структурного самозміцнення. Це підтверджує важливість урахування типу полімерної матриці та її кристалічності при виборі матеріалів для вузлів, що працюють в умовах інтенсивного фрикційного навантаження, та відкриває перспективи використання Zedex zx-100k у високонавантажених триботехнічних системах.

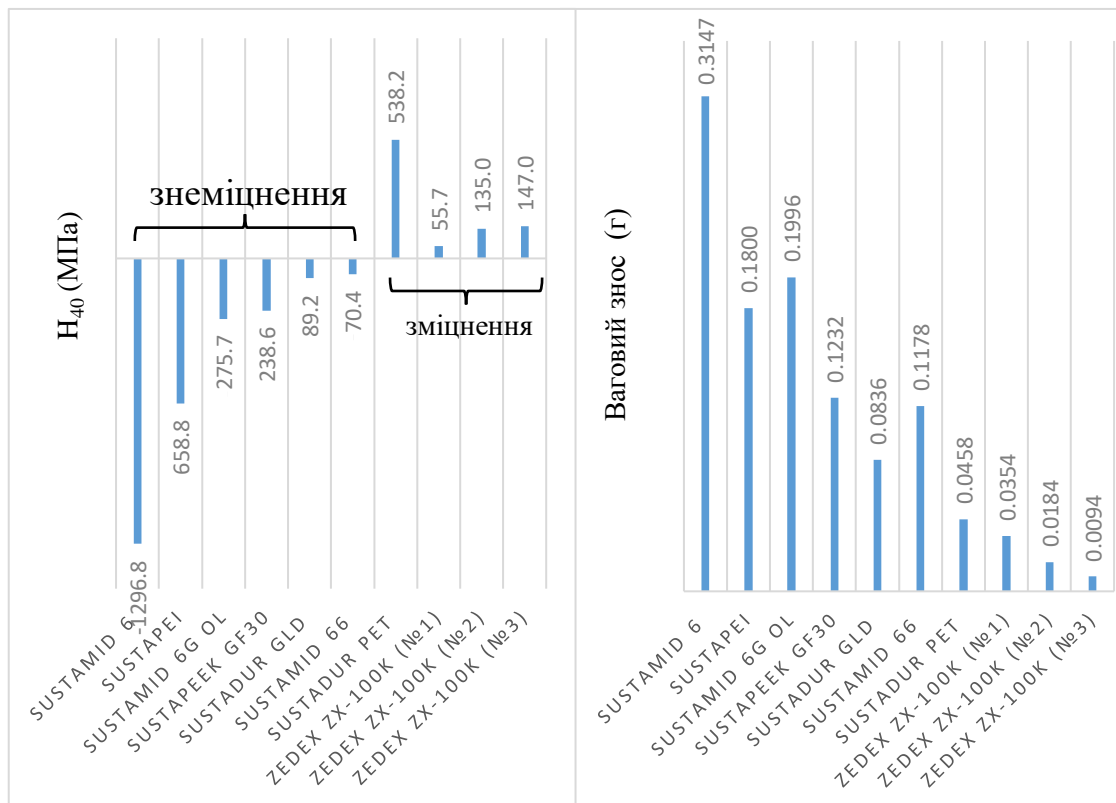


Рис. 3.7. Порівняння вагового зносу та мікротвердості матеріалів: результати експериментальних досліджень.

Результати випробувань Zedex zx-100k підтвердили його здатність до зміцнення навіть у жорстких режимах експлуатації. Встановлено, що при збільшенні швидкості ковзання матеріал зберігає позитивну тенденцію до зростання мікротвердості, хоча при швидкості 5.5 м/с інтенсивність зміцнення дещо знижується через вплив

термодеструкції. Здатність Zedex zx-100k до формування зміцненого поверхневого шару безпосередньо корелює з його високою зносостійкістю та стабільністю моменту тертя, що було зафіксовано на попередніх етапах трибOMETричних досліджень. Така структурна адаптивність робить цей матеріал перспективною матрицею для розробки високонавантажених полімерних композитів.

Встановлено пряму кореляційну залежність між температурною напруженістю контакту та градієнтом мікротвердості. Зокрема, для термостійких полімерів помірне зростання температури в зоні тертя стимулює процеси релаксації внутрішніх напружень та вторинної кристалізації, що підтверджується зростанням твердості на 5–8% порівняно з вихідним станом

Враховуючи високу в'язкопружність полімерних матриць, особливу увагу було приділено стандартизації часу витримки під навантаженням та часу до моменту вимірювання діагоналі відбитка, оскільки еластичне відновлення матеріалу Zedex zx-100k після зняття індентора може призводити до значних спотворень результатів при недотриманні часового регламенту

Узагальнюючи результати дослідження мікротвердості, можна зробити висновок про визначальну роль структурної адаптації у забезпеченні довговічності вузлів тертя. Виявлений взаємозв'язок між швидкістю ковзання та зміною твердості дозволяє прогнозувати поведінку полімеру в умовах змінного механо-термічного впливу. Вибір полімерних матеріалів з урахуванням їхньої здатності до поверхневого зміцнення є ключовим фактором при проектуванні деталей машин, що працюють у важких режимах без мастильного матеріалу. Отримані дані щодо мікротвердості Zedex zx-100k стануть основою для подальшої розробки композиційних матеріалів із заданими триботехнічними характеристиками.

Аналіз отриманих результатів термічної кінетики в зоні фрикційного контакту дозволяє встановити фундаментальні закономірності перетворення механічної енергії тертя в теплову залежності від природи полімерної матриці. Для забезпечення наочності графічного представлення та уникнення надмірної візуальної насиченості, наведені дані

відображають усереднені значення, отримані шляхом інтеграції сигналів інфрачервоного пірометра та контактних терморезистивних перетворювачів, що дозволило нівелювати випадкові короточасні флуктуації без втрати загальної достовірності експерименту. Такий підхід забезпечує цілісне сприйняття динаміки нагріву протягом усього 75-хвилинного циклу випробувань, відображаючи реальні теплові потоки в системі «полімер — сталь 30ХГСА».

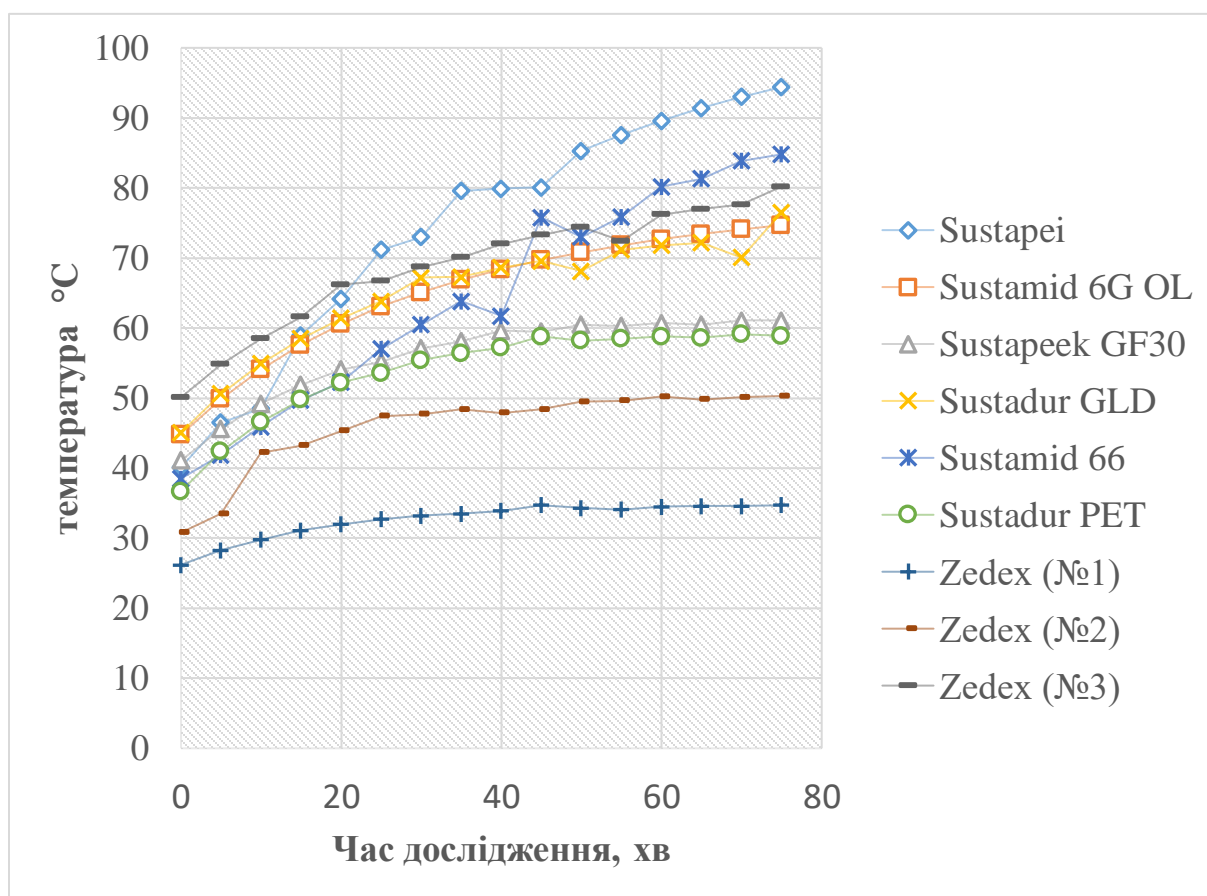


Рис. 3.8. Кінетика температурних полів у зоні фрикційного контакту полімерних матеріалів

Загальні тенденції варіації температурних показників демонструють чітку кореляцію з хімічною структурою та теплопровідністю досліджуваних матеріалів. Для немодифікованих поліамідів, зокрема Sustamid 6, характерним є інтенсивне та майже лінійне зростання температури, що зумовлено високою адгезійною складовою тертя та низьким порогом термостабільності. Натомість матеріали, армовані скловолокном, такі

як Sustapeek GF30, виявляють здатність до швидкої стабілізації температурних значень на нижчих рівнях, що пояснюється кращою дисипацією тепла крізь гетерогенну структуру композиту. Аномально високі початкові значення для окремих зразків, як-от Zedex №3, можуть бути інтерпретовані як наслідок специфічного режиму припрацювання або початкового термічного збурення системи, проте подальша стабілізація їхніх показників підтверджує високу адаптивність антифрикційних самозмашувальних термопластів.

Виявлені температурні екстремуми виступають індикаторами межових станів працездатності полімерних вузлів. Досягнення пікових температур для Sustapei та Sustamid 6, що наближаються до критичних значень експлуатаційного діапазону, ініціює процеси інтенсивного знеміцнення поверхневого шару. Це призводить до в'язкопружного розм'якшення матеріалу, що підтверджується значним падінням мікротвердості в зоні доріжки тертя. За таких умов відбувається перехід від стабільного сухого тертя до режиму адгезійного намазування, що неминуче викликає зростання коефіцієнта тертя через збільшення фактичної площі контакту та енергії розриву молекулярних зв'язків.

На противагу деструктивним процесам, помірне зростання температури для матеріалів серії Zedex та Sustadur PET сприяє формуванню оптимальних триботехнічних умов. У цьому випадку теплова енергія виступає каталізатором вторинної кристалізації та орієнтації макромолекул у напрямку ковзання, що призводить до явища фрикційного зміцнення (наклепу). Відповідно, формування зміцненої морфології поверхні сприяє стабілізації та подальшому зниженню коефіцієнта тертя за рахунок створення стійкої антифрикційної плівки перенесення. Таким чином, температурний розподіл у зоні контакту є не лише наслідком фрикційної взаємодії, але й визначальним чинником, що регулює фізико-механічні властивості поверхневого шару та загальну зносостійкість трибосистеми.

Аналіз кінетики коефіцієнта тертя досліджуваних полімерних матеріалів у парі зі сталлю 30ХГСА дозволяє розкрити глибокі взаємозв'язки між динамікою фрикційної

взаємодії та еволюцією фізико-механічного стану поверхневого шару. Оскільки графічне представлення результатів для ряду матеріалів характеризується високою щільністю значень, що ускладнює візуальну ідентифікацію окремих кривих, таблична форма фіксації параметрів ( $\mu$ ) є найбільш доцільною для проведення прецизійного кількісного аналізу (таб. 3.5). Отримані дані свідчать про те, що коефіцієнт тертя не є статичною величиною, а трансформується під впливом процесів припрацювання, температурної деструкції та структурної адаптації, що безпосередньо корелює з показниками мікротвердості доріжки тертя.

Таблиця 3.5

### Динаміка фрикційної взаємодії конструкційних полімерів в умовах сухого тертя

Матеріал / Час (хв)	0 (пуск)	5	15	25	35	45	55	65	75
Sustamid 6	0.42	0.44	0.46	0.48	0.49	0.5	0.51	0.52	0.53
Sustapei	0.38	0.41	0.43	0.44	0.45	0.45	0.46	0.47	0.48
Sustamid 6G OL	0.22	0.19	0.17	0.16	0.16	0.15	0.15	0.16	0.16
Sustapeek GF30	0.35	0.33	0.32	0.31	0.31	0.32	0.32	0.33	0.33
Sustadur GLD	0.18	0.16	0.14	0.13	0.13	0.13	0.14	0.14	0.14
Sustamid 66	0.4	0.42	0.43	0.44	0.44	0.45	0.46	0.46	0.47
Sustadur PET	0.28	0.25	0.23	0.22	0.21	0.21	0.2	0.21	0.22
Zedex (№1)	0.18	0.14	0.11	0.1	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08
Zedex (№2)	0.2	0.16	0.12	0.11	0.1	0.1	0.1	0.09	0.09
Zedex (№3)	0.22	0.18	0.14	0.12	0.11	0.11	0.1	0.1	0.1

Для групи матеріалів із вираженою схильністю до знеміцнення, таких як Sustamid 6 та Sustapei, зафіксовано чітку тенденцію до невинного зростання коефіцієнта тертя протягом усього циклу випробувань. Зокрема, для Sustamid 6 початкове значення  $\mu = 0.42$  зростає до критичних 0.53, що супроводжується інтенсивним тепловиділенням та переходом поверхні у в'язкопружний стан. Така триботехнічна нестабільність є прямим наслідком руйнування молекулярних зв'язків, що підтверджується екстремальним

падінням мікротвердості на рівні 1296.8 МПа. У цьому випадку високе тертя ініціює ланцюгову реакцію: ріст температури призводить до розм'якшення матриці, що збільшує фактичну площу контакту та адгезійну складову тертя, зумовлюючи подальше знеміцнення матеріалу.

На противагу цьому, антифрикційні матеріали серії Zedex zx-100k демонструють зворотну закономірність, де початковий період припрацювання завершується швидкою стабілізацією коефіцієнта тертя на рівні 0.08–0.11. Таке низьке значення фрикційного опору мінімізує генерацію тепла, створюючи умови для структурного зміцнення поверхні. Аналіз підтверджує, що стабільне тертя у випадку Zedex (зразки №1, №2, №3) сприяє зростанню мікротвердості (від 55.7 до 147.0 МПа), що свідчить про формування орієнтованої мікроструктури та ефективної антифрикційної плівки перенесення. Низький коефіцієнт тертя тут виступає не лише як експлуатаційний показник, а й як запобіжний чинник, що захищає полімер від термодеструкції.

Окремої уваги заслуговує поведінка Sustadur PET, який, незважаючи на помірні значення коефіцієнта тертя (0.20–0.22), виявив унікальну здатність до інтенсивного зміцнення поверхневого шару на 538.2 МПа. Це дозволяє зробити висновок, що за певних температурних режимів (близько 59°C) у поліетилентерефталаті переважають процеси вторинної кристалізації, які стабілізують трибосистему навіть за відсутності спеціальних антифрикційних домішок. Водночас для композиту Sustapeek GF30 зафіксовано осцилюючий характер зміни  $\mu$  у межах 0.31–0.33, що зумовлено абразивною дією скловолокна. Незначне знеміцнення цього матеріалу до 238.6 МПа вказує на те, що армуюча фаза бере на себе основне механічне навантаження, частково нівелюючи наслідки термічного розм'якшення ПЕЕК-матриці.

Таким чином, встановлено фундаментальну закономірність: матеріали з високим коефіцієнтом тертя ( $\mu > 0.35$ ) схильні до прогресуючого знеміцнення внаслідок переважання деструктивних термомеханічних процесів, тоді як полімери з низьким та стабільним значенням коефіцієнту тертя ( $\mu < 0.15$ ) демонструють здатність до фрикційного зміцнення. Виявлений зв'язок між мікротвердістю та динамікою

коефіцієнта тертя дозволяє використовувати показник HV (мікротвердість) як діагностичний параметр для оцінки якості формування плівок перенесення та прогнозування довговічності трибосистем. Отримані результати підтверджують, що мінімізація коефіцієнта тертя є ключовою умовою для активації адаптивних механізмів самоорганізації полімерних поверхонь.

### **3.4. Кореляційний аналіз взаємозв'язків між термічними, структурними та триботехнічними характеристиками поверхонь**

Для встановлення кількісних закономірностей фрикційної взаємодії та оцінки впливу процесів структурної адаптації на ресурс вузлів тертя було проведено комплексний кореляційний аналіз. Методологічна основа дослідження ґрунтується на системному зіставленні масивів експериментальних даних, отриманих у процесі трибометричних випробувань, пірометричного контролю та мікромеханічних вимірювань. Такий підхід дозволив не лише визначити характерні залежності між коефіцієнтом змцнення, інтенсивністю вагового зносу та температурними режимами, але й кількісно оцінити їхній взаємний вплив.

Застосування кореляційного аналізу забезпечило можливість виявлення статистично значущих тенденцій, що відображають роль структурної адаптації поверхонь у стабілізації процесів тертя. Отримані результати свідчать про те, що змцнення полімерної матриці супроводжується певним зниженням інтенсивності зношування, тоді як перевищення критичних температурних порогів може призводити до втрати несучої здатності матеріалу. Таким чином, комплексний підхід до аналізу даних дозволяє не лише описати емпіричні закономірності, але й сформулювати узагальнену модель впливу мікромеханічних та термічних факторів на довговічність полімерних вузлів тертя

Для забезпечення достовірності результатів нормальне навантаження в зоні контакту було прецизійно встановлено на рівні  $N = 29.82$  Н. Це стало можливим завдяки

попередньому градуюванню навантажувальної пружини (див. підрозділ 2.2), що дозволило нівелювати систематичну похибку задавання тиску.

Стабільність заданого силового режиму протягом усього циклу випробувань забезпечила високу відтворюваність результатів та мінімізувала розсіювання експериментальних точок на побудованих кореляційних полях. Така прецизійна синхронізація механічних параметрів із даними температурного моніторингу дозволила встановити пряму залежність між кінетикою тепловиділення та динамікою зміни мікротвердості приповерхневих шарів полімерів. Отримані у такий спосіб масиви даних стали надійною базою для розрахунку коефіцієнтів детермінації, що підтверджують статистичну значущість виявлених ефектів фрикційного зміцнення. Узагальнення цих закономірностей заклало необхідне підґрунтя для ідентифікації критичних точок термодинамічної стійкості композитів та подальшого обґрунтування концепції активаційного нагріву як пускового механізму структурної адаптації

Розрахунок інтенсивності вагового зносу  $I_g$  проводився за формулою:

$$I_g = \frac{\Delta m}{N \times t \times A} \quad (3.1)$$

де  $\Delta m$  - ваговий знос (г),  $N$  – нормальне навантаження (Н),  $A$  – площа контакту ( $m^2$ ),  $t$  – час випробування (с).

Коефіцієнт парної кореляції  $r_{xy}$  розраховувався для вибірки досліджуваних полімерних матеріалів з метою кількісної оцінки взаємозв'язку між показниками структурної адаптації та теплового навантаження. Методика базувалася на статистичному аналізі експериментальних даних, що включали значення коефіцієнта зміцнення та максимальні температури зразків, отримані у процесі трибометричних випробувань.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.2)$$

де  $x_i$  - значення коефіцієнта зміцнення для  $i$ -го матеріалу,  $y_i$  - відповідне значення максимальної температури,  $n$  - кількість досліджуваних матеріалів.

Використання кореляційного підходу дозволяє визначити ступінь лінійної залежності між двома змінними та оцінити силу й напрямок їх взаємного впливу. Для цього застосовувалася класична формула коефіцієнта Пірсона, яка має вигляд:

Таблиця 3.6

### Параметри структурної адаптації та температурної напруженості антифрикційних полімерних систем у процесі фрикційної взаємодії

Матеріал	Максимальна темп. контакту $T_{\max}$ °C	Коефіцієнт зміцнення $K_h$	Площа контакту $A$ мм <sup>2</sup>	Інтенсивність вагвого зносу $I_g$ г/(Н*с*м <sup>2</sup> )
Sustamid 6	89.7	-2.43	5.10E-05	4.60E-02
Sustapei	94.4	-1.95	5.10E-05	2.63E-02
Sustamid 6G OL	74.7	-0.27	5.04E-05	2.95E-02
Sustapeek GF30	61.1	-0.48	4.96E-05	1.85E-02
Sustadur GLD	76.5	-0.16	5.02E-05	1.24E-02
Sustamid 66	84.8	-0.21	5.07E-05	1.73E-02
Sustadur PET	59.1	0.67	4.95E-05	6.89E-03
Zedex (№1)	34.7	0.26	4.90E-05	5.39E-03
Zedex (№2)	50.3	0.46	4.99E-05	2.75E-03
Zedex (№3)	80.2	0.48	4.87E-05	1.44E-03

Аналіз взаємозв'язку між термічним станом трибосистеми та механічними трансформаціями поверхневих шарів дозволяє розкрити складну природу структурної адаптації полімерів. Отримане значення коефіцієнта кореляції  $r = -0.65$  свідчить про наявність помітного зворотного зв'язку, що за шкалою Чеддока класифікується як значуща залежність [167]. Математично це означає, що приблизно 42% варіації показника зміцнення зумовлено саме температурним чинником, тоді як решта змін припадає на особливості молекулярної структури та умови навантаження.

Термомеханічний дуалізм фрикційного контакту з позицій фізики конденсованого стану полягає у подвійній ролі температури в зоні тертя. З одного боку, підвищення

температури активує рухливість макромолекулярних ланцюгів, що є необхідною умовою для їхньої переорієнтації в напрямку ковзання та формування вторинних структур перенесення. З іншого боку, перевищення критичного енергетичного порогу спричиняє домінування процесів термомеханічної деструкції, які супроводжуються розривом міжмолекулярних зв'язків і зниженням несучої здатності полімерної матриці.

Отримані результати кореляційного аналізу підтверджують цю подвійність: від'ємний знак коефіцієнта кореляції для більшості досліджуваних термопластів (зокрема групи Sustamid) свідчить про те, що температурна напруженість виступає як дестабілізуючий фактор. Вона індукує «розм'якшення» матриці та перехід до режиму інтенсивного зношування, що в кінцевому підсумку знижує ресурс вузлів тертя. Таким чином, температура у зоні контакту одночасно є рушійною силою процесів адаптації та потенційним джерелом деградації, що визначає складність і суперечливість механізмів фрикційної взаємодії полімерних матеріалів.

Встановлена кореляція дозволяє стверджувати, що для кожного полімеру існує власне «вікно структурної адаптації» — температурний інтервал, у межах якого коефіцієнт зміцнення  $K_n$  набуває максимальних значень. Для Zedex zx-100k це вікно є найширшим завдяки наявності антифрикційних домішок, що утримують систему у зоні позитивного зміцнення навіть за варіації швидкісних режимів. Для Sustadur PET воно має вузький і специфічний характер, що робить матеріал чутливим до найменших змін умов тертя. Для Sustamid 6 дане вікно зміщене в область низьких температур, які у реальних умовах сухого тертя ( $V=2,8$  м/с) швидко долаються, спричиняючи стабільне знеміцнення поверхні. Таким чином, розраховане значення коефіцієнта парної кореляції  $r=-0.65$  виступає інтегральним показником «термічної вразливості» досліджуваних матеріалів. Воно підтверджує, що ефективне управління триботехнічним ресурсом можливе лише за умови утримання робочої температури у межах, які стимулюють вторинну кристалізацію, але не допускають термодеструкції полімерної основи.

З точки зору математичної статистики, коефіцієнт кореляції  $-0.88$  відповідає коефіцієнту детермінації  $R^2=0.774$ . Це означає, що 77,4% усіх змін інтенсивності

зношування ( $I_g$ ) безпосередньо зумовлені здатністю поверхневого шару до зміцнення ( $K_h$ ), тоді як решта 22.6% пояснюються дією додаткових чинників (мікрогеометрією контртіла, коливаннями швидкості, вологістю тощо). Такий високий рівень детермінації підтверджує релевантність показника мікротвердості доріжки тертя як критерію прогнозування ресурсу, що має практичну цінність для розробки нових композитів.

Зворотний характер зв'язку (від'ємний знак коефіцієнта) пояснюється зміною механізму руйнування при переході від знеміцненого стану до зміцненого. У зоні адаптивного зміцнення ( $K_h > 1.0$ ) для матеріалів типу Zedex zx-100k та Sustadur PET формування наклепаної структури супроводжується орієнтацією макромолекул і зростанням щільності фазової плівки. Це створює механічний бар'єр, який підвищує критичне напруження зрізу, унаслідок чого енергія тертя витрачається не на відрив частинок, а на підтримку пружних деформацій у зміцненому шарі. Як наслідок, інтенсивність зносу  $I_g$  знижується до мінімальних значень.

Натомість у зоні деструктивного знеміцнення ( $K_h < 1.0$ ) — характерній для Sustamid 6 — енергія фрикційної взаємодії ініціює деструкцію макромолекулярних ланцюгів, що призводить до падіння когезійної міцності. Розм'якшений шар легко видаляється зі сталеві поверхні через адгезійний відрив або мікрорізання, а низьке значення  $K_h$  виступає індикатором «порога руйнування», після якого інтенсивність зношування різко зростає.

Висока кореляція підтверджує прагнення трибосистеми до стану мінімального виробництва ентропії шляхом формування вторинних структур. При  $K_h > 1.0$  відбувається вирівнювання локальних тисків, твердіша поверхня менше деформується під дією навантаження  $N$ , що стабілізує площу фактичного контакту. Одночасно знижується адгезійна взаємодія: зміцнена поверхня має меншу вільну енергію та вищий опір до утворення містків зварювання зі сталлю 30ХГСА. Саме це математично відображається у сильному зворотному зв'язку між коефіцієнтом зміцнення та інтенсивністю вагового зносу.

### Висновки до розділу 3.

1. Розроблено та реалізовано комплексну методику триботехнічних випробувань, яка поєднує прямі вимірювання вагового зносу та моменту тертя з безконтактним моніторингом температурних полів та лазерною профілометрією поверхонь. Застосування прецизійного метрологічного обладнання (ІЧ-пірометрії та диференційно-фазової мікроскопії) дозволило виключити механічний вплив на в'язкопружну полімерну матрицю під час вимірювань, що забезпечило високу достовірність та відтворюваність експериментальних даних.

2. Встановлено, що введення змащувальних компонентів у структуру поліаміду (матеріал SusTamid 6G OL) забезпечує зниження моменту тертя на 17.5 % порівняно з базовим поліамідом PA66. Це безпосередньо призводить до стабілізації теплового режиму вузла тертя: пікова температура в зоні контакту для SusTamid 6G OL не перевищувала 60 °С, тоді як для високоміцних, але немодифікованих аморфних полімерів (Sustapei), зафіксовано термічну напруженість на рівні 135 °С, що створює ризик теплової деструкції поверхневого шару.

3. Аналіз розвитку мікрогеометрії поверхонь тертя за допомогою кривої Аббота-Файрстоуна виявив існування діапазону оптимальних швидкостей ковзання (в околі 2.8 м/с) для антифрикційних полімерів типу Zedex zx-100k. У цьому режимі спостерігається максимальне згладжування мікронерівностей (зниження  $R_a$  до 0.003 мкм) та зростання несучої здатності поверхні до 71 %. Вихід за межі даного швидкісного режиму ініціює перехід до термічного зношування, що характеризується падінням опорної здатності у 1.9 раза та формуванням дефектів оплавлення.

4. Дослідження мікротвердості в зоні доріжки тертя дозволило класифікувати полімери за їхньою здатністю до структурної адаптації. Визначено, що на відміну від традиційних поліамідів (Sustamid 6), які схильні до знеміцнення внаслідок механодеструкції молекулярних зв'язків, матеріал Zedex zx-100k виявляє позитивну тенденцію до зміцнення поверхневого шару. Експериментально отримані значення  $\Delta H$  підтверджують, що орієнтація макромолекул та вторинна кристалізація під дією

термомеханічного навантаження формують зміцнену морфологію, яка підвищує опірність матеріалу до зношування.

5. Математично обґрунтовано взаємозв'язок між термічним режимом та структурним станом поверхонь. Встановлено помітний зворотний кореляційний зв'язок ( $r = -0.65$ ) між максимальною температурою контакту  $T_{\max}$  та коефіцієнтом зміцнення  $K_h$ . Це доводить, що інтенсивне тепловиділення виступає деструктивним чинником, який ініціює термомеханічне розм'якшення матриці та блокує процеси адаптивного зміцнення для більшості досліджених термопластів.

6. Виявлено сильну зворотну кореляцію ( $r = -0.88$ ) між показником зміцнення  $K_h$  та інтенсивністю вагового зносу  $I_g$ . Це дозволяє використовувати мікротвердість доріжки тертя як надійний предиктивний індикатор триботехнічного ресурсу полімерних композитів. Зафіксовано аномальну поведінку немодифікованого полімеру Sustadur PET, який за помірної температурної напруженості ( $\sim 59$  °C) продемонстрував стійке зміцнення поверхні ( $K_h = 1.48$ ). Це свідчить про реалізацію механізму орієнтаційної кристалізації в аморфно-кристалічній матриці PET, що відкриває шлях до використання базових полімерів у вузлах тертя за умови суворого контролю теплового балансу.

Отримані експериментальні залежності між швидкістю ковзання, температурою контакту та показниками мікротвердості доводять перспективність використання полімеру Zedex zx-100k та модифікованих поліамідів як базових матриць для створення високонавантажених композиційних матеріалів. Результати третього розділу складають основу для подальшого теоретичного обґрунтування процесів самозмащування та розробки ресурсу композиційних підшипників ковзання.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА ТА КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ І ПРОЦЕСІВ СТРУКТУРНОЇ АДАПТАЦІЇ АНТИФРИКЦІЙНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ СИСТЕМ

Четвертий розділ присвячено логічному переходу від аналізу фундаментальних механізмів структурної адаптації чистих полімерних матриць до розробки та комплексного дослідження багатокomпонентних композиційних систем. Пріоритетним завданням цього етапу є синтез експериментальних епоксиграфітових композитів на базі реактопластичної матриці та їхній багатовекторний порівняльний аналіз із сучасними промисловими антифрикційними матеріалами різної фізико-хімічної природи — високотехнологічним стандартом на основі поліефірефіркетону (Zedex ZX-324 V2T) та графітонаповненим полістиролом (ПС-6).

Такий методологічний підхід дозволяє виявити закономірності цілеспрямованого керування процесами структурної адаптації за допомогою введення функціональних наповнювачів, що володіють різними механізмами самозмащування (PTFE та графіт). У межах розділу особливу увагу приділено дослідженню кінетики термічної напруженості, виявленню ефектів температурної стабілізації контакту та встановленню математичних залежностей між мікромеханічними характеристиками поверхонь і їхньою зносостійкістю.

Використання методів кореляційного аналізу дало змогу не лише описати емпіричні результати, а й сформулювати узагальнену концепцію триботехнічної надійності. У цій концепції композиційна система розглядається як інструмент активної трансформації енергії тертя у ресурс самозміцнення матеріалу, що відкриває шлях до науково обґрунтованої оптимізації ресурсу високонавантажених підшипників ковзання.

Таким чином, четвертий розділ не лише розширює теоретичні уявлення про механізми структурної адаптації, але й формує практичну основу для створення нових антифрикційних композитів, здатних забезпечувати стабільну роботу вузлів тертя у високонавантажених умовах.

#### **4.1. Обґрунтування вибору компонентів та технології формування композитів для триботехнічних досліджень.**

Обґрунтування вибору компонентів та технології формування композитів базувалося на принципі синергії між жорсткою полімерною матрицею та наповнювачами, що володіють ефектом самозмащування. У якості матриці для експериментальних зразків було використано епоксидну смолу Epikote LR285, яка характеризується щільністю 1.18–1.23 г/см<sup>3</sup> та в'язкістю 600–900 мПа·с. Її вибір зумовлений високою адгезійною здатністю, якісними механічними властивостями та можливістю формування однорідної структури при низьких температурах затвердіння. Крім того, смола LR285 відома у промисловості як матеріал для виробництва авіаційних та суднобудівних конструкцій, що підтверджує її стабільність та технологічну універсальність.

З метою оптимізації триботехнічних характеристик розроблюваних композитів, до їхнього складу було введено дисперсний графітовий порошок. Вибір графіту як твердого змащувального компонента обумовлений його унікальною шаруватою структурою, де паралельні гексагональні шари атомів вуглецю утримуються слабкими силами Ван-дер-Ваальса. Це забезпечує легкий міжшаровий зсув під дією тангенціальних напружень, що сприяє суттєвому зниженню коефіцієнта тертя. Окрім антифрикційної функції, графіт відіграє критичну роль у стабілізації температурного режиму в зоні фрикційного контакту: завдяки високій теплопровідності він інтенсифікує відведення теплоти від робочих поверхонь, запобігаючи локальному перегріву та термічній деградації полімерної матриці.

Для об'єктивної оцінки ефективності розроблених складів як еталон порівняння було обрано промисловий антифрикційний композит Zedex ZX-324 V2T. Даний матеріал базується на поєднанні полієфірефіркетону (PEEK) та політетрафторетилену (PTFE), що представляє собою класичний приклад реалізації концепції «жорстко-гнучкого синергізму». В такій системі високоміцна матриця PEEK забезпечує опір механічним

навантаженням та мікрорізанню, тоді як PTFE, мігруючи на поверхню контртіла, формує стійку адгезійну трибоплівку.

Ключовим елементом порівняльного аналізу та контрольним зразком у роботі визначено промисловий антифрикційний композит Zedex ZX-324 V2T. Вибір даного матеріалу як еталона зумовлений його статусом промислового стандарту для високонавантажених вузлів тертя, що функціонують у критичних температурних режимах. Матеріал базується на синергії високоміцної матриці з полієфірефіркетону (PEEK) та антифрикційної модифікації політетрафторетиленом (PTFE). Полієфірефіркетон забезпечує композиту виключну механічну міцність, хімічну стійкість та екстремальну термостійкість із тривалими робочими температурами до +250 °C (короткочасно до +260 °C). Введення PTFE реалізує ефект самозмащування за рахунок міграції фторопласту на поверхню контртіла та формування стабільної трибоплівки, що суттєво знижує коефіцієнт тертя та мінімізує абразивне зношування навіть при інтенсивних навантаженнях. Завдяки стійкості до агресивних хімічних середовищ та водяної пари, Zedex ZX-324 V2T широко застосовується у суднобудуванні, хімічному машинобудуванні та автомобільній галузі, що робить його ідеальним орієнтиром для оцінки ефективності нових розробок.

На противагу перевагам графіту, використання скловолокна як армувального наповнювача у високонавантажених вузлах тертя має суттєві обмеження. Попри значне підвищення статичної міцності та жорсткості, скляні волокна діють як інтенсивний абразив після виходу на поверхню контакту внаслідок зношування матриці. Це призводить до деградації сталевого контртіла та різкого зростання коефіцієнта тертя.

З термічної точки зору, скловолокно, на відміну від графіту, має низьку теплопровідність, що сприяє акумуляції теплоти в зоні фрикційного контакту. Локальне перегрівання провокує термічне розм'якшення полімеру навколо волокон, що полегшує їх виривання (дислокацію) та прискорює руйнування композиту за механізмом абразивного зношування. Саме тому фокус дослідження було зміщено на графіт, який забезпечує синергію антифрикційних властивостей та ефективного тепловідводу.

Технологічний маршрут виготовлення експериментальних зразків передбачав попереднє нагрівання форм до 35 °С, що дозволяло мінімізувати ризик седиментації графітових наповнювачів у полімерній матриці. Подальша термообробка здійснювалася при температурі 50–55 °С, що забезпечувало рівномірне структуроутворення та стабілізацію системи. Для досягнення підвищеної теплостійкості на рівні +72 °С застосовувалася додаткова стадія стабілізації при 80 °С, яка сприяла формуванню більш термостійкої морфології та покращенню експлуатаційних характеристик композитів.

Таким чином, вибір компонентного складу та оптимізація технологічних параметрів їх обробки були спрямовані на досягнення балансу між механічною міцністю, антифрикційними властивостями та термостійкістю. Подібний підхід відповідає загальноприйнятим практикам створення полімерних композиційних систем для триботехнічних застосувань, де контроль температурних режимів і стабілізаційних процесів є ключовим чинником забезпечення довговічності та надійності матеріалів[168].

З метою розширення об'єктивності порівняльного аналізу та верифікації триботехнічних показників експериментальних зразків, до переліку об'єктів дослідження було включено промисловий графітонаповнений композит марки ПС-6 (на базі полістиролу). Вибір даного матеріалу зумовлений його широким застосуванням у якості стандартного антифрикційного рішення середнього цінового сегменту [169]. ПС-6, виготовлений методом суспензійної полімеризації, характеризується високою однорідністю розподілу графітових часток у стінках полімерних комірок, що забезпечує стабільність його фізико-механічних властивостей. Окрім антифрикційної складової, даний композит вирізняється аномально низькою теплопровідністю (0.0309 Вт/(м×К)), що дозволяє використовувати його як термічний ізолятор у вузлах тертя, чутливих до теплових деформацій.

Включення ПС-6 у структуру дослідження має на меті створення трикомпонентної бази для порівняння: експериментальні епоксиграфітові композити зіставляються як з «еталонним» високотемпературним поліефіркетеном (Zedex ZX-324 V2T), так і з

масовим термопластичним рішенням (ПС-6). Це дозволяє не лише оцінити абсолютні значення зносостійкості розроблених зразків, а й визначити їхнє місце у ієрархії антифрикційних матеріалів — від бюджетних промислових рішень до прецизійних інженерних систем. Таким чином, комплексне дослідження зазначених композитів забезпечує цілісне розуміння того, як природа полімерної матриці (термопласт проти реактопласта) у поєднанні з графітовим наповнювачем впливає на формування адаптивних поверхонь у складних режимах ковзання. Дослідження Zedex ZX-324 V2T у комплексі з експериментальними епоксиграфітовими композитами та ПС-6 створює багатовимірну методологічну основу для аналізу трибологічних характеристик. Це дозволяє не лише підтвердити ефективність розроблених систем відносно світових аналогів, але й визначити найбільш перспективні напрями вдосконалення антифрикційних полімерних композитів для вузлів тертя нового покоління.

#### **4.2. Аналіз закономірностей формування вторинних структур за параметрами тертя та температурної динаміки контакту.**

Аналіз кінетики мікротвердості поверхневих шарів після триботехнічного навантаження становить один із ключових методів для виявлення та інтерпретації процесів структурної перебудови у полімерних композитах. Вимірювання зміни твердості у зоні доріжки тертя ( $\Delta H$ ) виступає інтегральним показником, що відображає баланс між деструктивними термомеханічними явищами, які спричиняють локальне зниження міцності та деградацію полімерної матриці, та адаптивними механізмами зміцнення, що реалізуються через структурну релаксацію, орієнтацію макромолекул і формування вторинних фізико-хімічних зв'язків. У цьому контексті кінетика мікротвердості може розглядатися як своєрідний індикатор рівноваги між руйнуванням та самозміцненням матеріалу в умовах тертя, що дозволяє кількісно оцінити інтенсивність зазначених процесів і встановити закономірності їхнього перебігу залежно від природи полімерної матриці та фазового складу композиту.

Експериментальні дані, отримані для широкого спектра полімерних систем — від реактопластів із жорстко зшитою структурою до термопластів із можливістю терморелаксації та аморфних систем із високою мобільністю сегментів, — наведені у табл. 4.1. Вони демонструють фундаментальну залежність трибологічної поведінки від фазового складу та морфологічних особливостей матеріалу. Для реактопластів характерним є переважання деструктивних процесів, що проявляється у зниженні мікротвердості, тоді як термопласти та аморфні полімери здатні реалізовувати механізми адаптивного зміцнення, що забезпечує стабілізацію або навіть підвищення твердості поверхневих шарів.

Таблиця 4.1

**Динаміка фрикційної взаємодії конструкційних композитів в умовах сухого тертя**

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

Таким чином, систематичне дослідження кінетики мікротвердості після триботехнічного навантаження відкриває можливість комплексної ідентифікації структурних трансформацій у полімерних композитах. Це створює підґрунтя для розроблення науково обґрунтованих критеріїв оцінки їхньої працездатності та довговічності в умовах експлуатації, а також сприяє формуванню практичних

рекомендацій щодо оптимізації складу і структури матеріалів для підвищення їхньої ефективності у трибологічних системах.

Дослідження експериментальних зразків на основі епоксидної смоли Epikote LR285 виявило стійку тенденцію до знеміцнення поверхневих шарів у зоні доріжки тертя для всіх досліджених концентрацій графітового наповнювача. Найбільш інтенсивне падіння мікротвердості ( $\Delta H=183\text{МПа}$ ) зафіксовано при мінімальному вмісті графіту (7.9%), що безпосередньо корелює з найвищими показниками вагового зносу. Така поведінка свідчить про недостатню здатність матриці протидіяти термомеханічним навантаженням у випадку низької концентрації модифікатора, коли тепловий потік у зоні контакту не має ефективних каналів відведення.

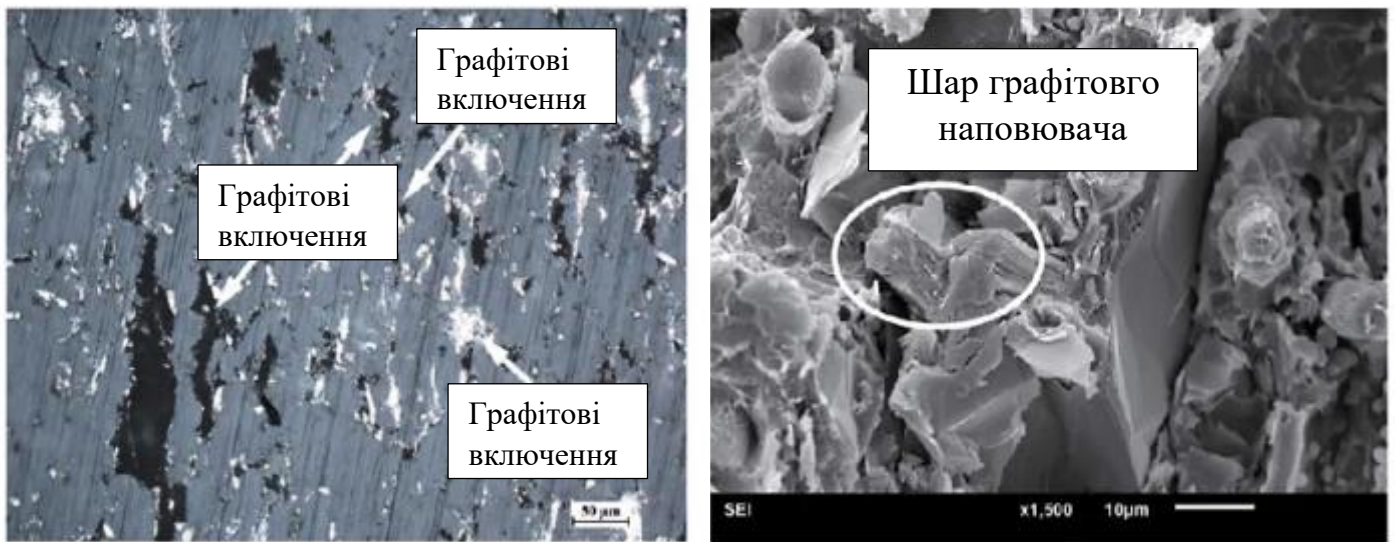


Рис. 4.1. Мікрофотографія морфології поверхні зношування композиту

На представлених SEM-знімках чітко візуалізується формування тонкої, когерентної антифрикційної плівки на робочих поверхнях. Графітові включення, мігруючи із об'єму матриці, рівномірно заповнюють мікрозападини контртіла, що мінімізує реальну площу механічного контакту «полімер-метал». Спостерігається виражена орієнтація часток графіту паралельно вектору ковзання. Це підтверджує реалізацію механізму міжшарового зсуву за слабкими зв'язками Ван-дер-Ваальса, що є ключовим чинником зниження коефіцієнта тертя.

На відміну від абразивного руйнування, характерного для скловолокнистих композитів, поверхня зношування зразків із графітом відзначається відсутністю глибоких борозен та мікротріщин. Поверхня має згладжений рельєф, що свідчить про переважання адгезійного зношування та ефективне відведення теплоти.

Зі збільшенням концентрації графітового наповнювача до 20.5% спостерігається суттєве інгібування процесів знеміцнення: величина  $\Delta H$  зменшується до 61 МПа. Це підтверджує стабілізуючу роль графіту, який завдяки високій теплопровідності інтенсифікує відведення теплоти з плями контакту, знижуючи рівень термодеструкції епоксидної матриці. Крім того, графітові частки можуть виконувати функцію своєрідних «теплових мостів», що забезпечують більш рівномірний розподіл температури та зменшують локальні перегріву, які є критичними для реактопластичних систем.

Водночас загальний дефіцит термостійкості епоксидної основи за умов високих швидкостей ковзання залишається визначальним фактором деградації. Локальне накопичення теплоти призводить до руйнування когезійних зв'язків у полімерній матриці, що зумовлює перехід матеріалу у стан механічної деградації. Таким чином, навіть за наявності стабілізуючого ефекту графітового наповнювача, реактопластична природа епоксидної смоли визначає обмеження її працездатності у трибологічних системах, де домінують інтенсивні термомеханічні навантаження.

Ця термічна вразливість визначає граничні режими експлуатації, за яких інтенсивне теплонакопичення спричиняє незворотну деградацію властивостей композита. Відтак, встановлення критичних температур деструкції є основою для прогнозування ресурсу високонавантажених авіаційних трибосистем

З огляду на це, ключовим завданням стає визначення меж термостійкості та розробка методів стабілізації епоксидних композитів для роботи у високошвидкісних режимах. Перспективним напрямом є пошук ефективних модифікаторів та гібридних систем, здатних компенсувати термічну вразливість матриці та забезпечити прогнозовану довговічність у критичних умовах експлуатації.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що оптимізація концентрації графітового наповнювача є критичною умовою для підвищення трибологічної стабільності епоксидних композитів. Водночас вони підкреслюють необхідність пошуку додаткових шляхів модифікації матриці, спрямованих на підвищення її термостійкості та здатності протидіяти локальним процесам деградації.

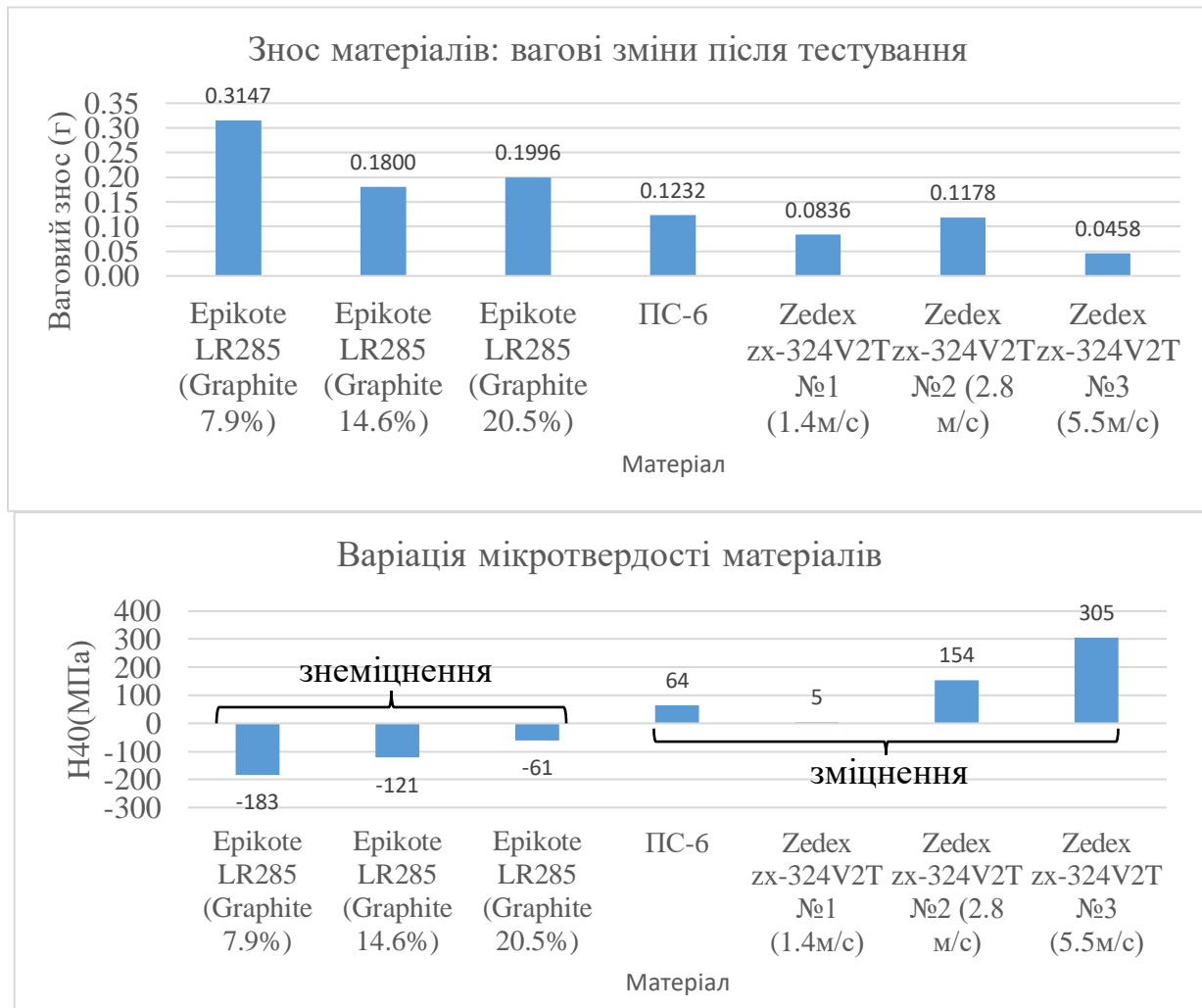


Рис. 4.2. Експериментальні результати дослідження композитних систем

Особливості структурної адаптації термопластичних систем на прикладі композитів ПС-6 та Zedex демонструють принципово інший характер трибологічної поведінки порівняно з епоксидними матеріалами. На відміну від реактопластів, композит ПС-6 виявив здатність до позитивної структурної адаптації, що підтверджується зростанням мікротвердості ( $\Delta H = 64 \text{ МПа}$ ). Даний ефект пояснюється

механічною орієнтацією макромолекул полістиролу у напрямку дії тангенціальних напружень, що призводить до локального ущільнення поверхневого шару та підвищення його опору термомеханічним навантаженням. Важливим чинником є також однорідність розподілу графітового наповнювача у пористій структурі ПС-6, яка сприяє формуванню антифрикційного екрана. Це підтверджується відносно низьким рівнем вагового зносу (0.0402 г), що свідчить про ефективність синергетичної взаємодії матриці та модифікатора.

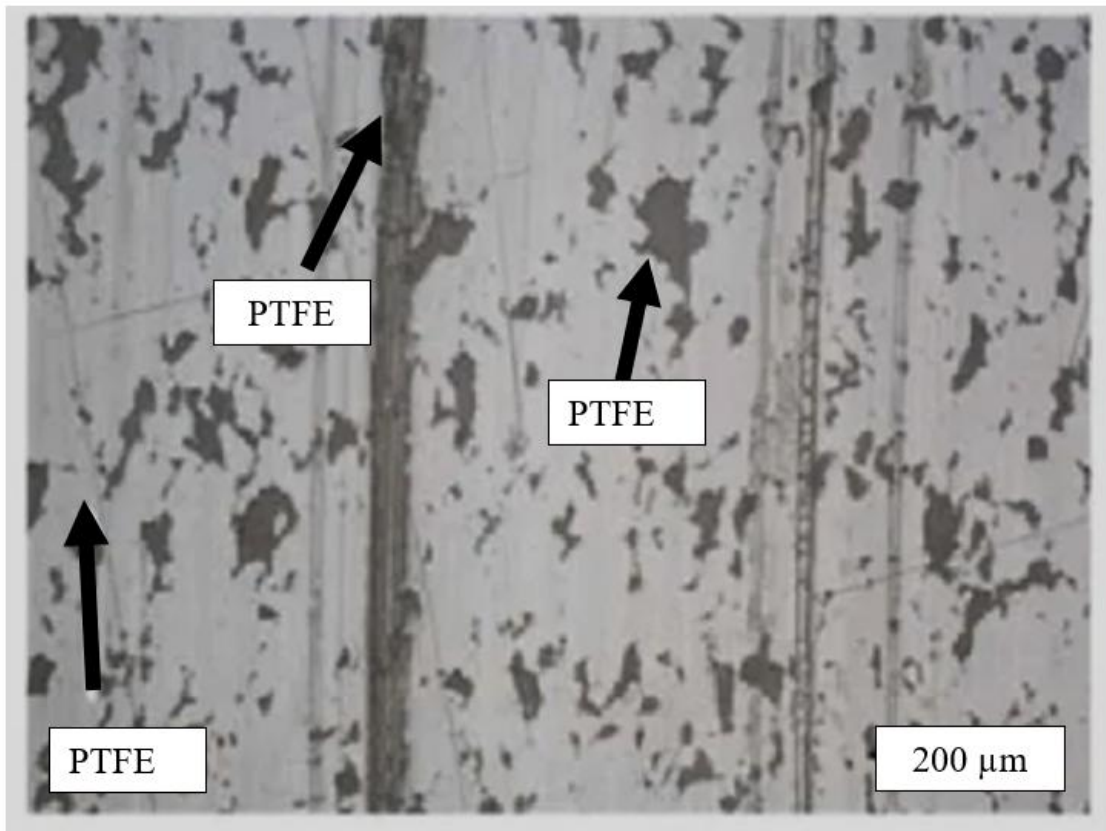


Рис. 4.3. Мікрофотографія поверхні композиту РЕЕК+РТФЕ після триботехнічного навантаження.

Максимальний адаптивний потенціал зафіксовано для промислового композиту Zedex zx-324V2T, який поєднує поліефіркетон (РЕЕК) та політетрафторетилен (РТФЕ). Аналіз результатів при варіації швидкості ковзання виявив чіткі закономірності. За низьких швидкостей (1.4 м/с) зміцнення є мінімальним ( $\Delta H=5\text{МПа}$ ), що свідчить про недостатність енергетичного впливу для глибокої перебудови структури. Проте зі

зростанням швидкості до 5.5 м/с спостерігається лавиноподібне збільшення доріжки тертя ( $\Delta H=305\text{МПа}$ ), яке супроводжується парадоксальним зниженням вагового зносу у 2.3 рази. Цей ефект свідчить про перехід системи у стан динамічної самоорганізації, де фрикційний розігрів стає рушійною силою для фазових перетворень. Такий феномен пояснюється синергією компонентів: жорстка матриця РЕЕК під дією термомеханічного навантаження зазнає вторинної кристалізації та орієнтаційного зміцнення, тоді як РТФЕ мігрує на поверхню контртіла, формуючи стійку антифрикційну плівку. Остання мінімізує адгезійну складову тертя, дозволяючи енергії контакту витратитися переважно на корисну структурну модифікацію поверхневого шару.

Важливо зазначити, що сформований шар переносу відіграє роль «твердого мастила», яке не лише знижує коефіцієнт тертя, а й виступає термічним бар'єром, що локалізує деформаційні процеси у надтонкому приповерхневому шарі. Це запобігає поширенню деструктивних внутрішніх тріщин углиб матриці, забезпечуючи високу трибологічну витривалість композиту навіть за критичних режимів експлуатації. Візуалізація цього процесу за допомогою електронної мікроскопії підтверджує якісну зміну топографії поверхні.

На відміну від чистих полімерів, поверхня композиту РЕЕК+РТФЕ після тертя характеризується винятковою гладкістю. Такий ефект зумовлений заповненням мікронерівностей жорсткої матриці РЕЕК частками РТФЕ, які діють як своєрідний «пластичний наповнювач», вирівнюючи топографію поверхні та формуючи рівномірний контактний шар. Це свідчить про ефективну взаємодію компонентів композиту.

На мікрофотографіях рис. 4.3. чітко простежуються характерні островці РТФЕ, що проявляються у вигляді світліших витягнутих зон. Вони є результатом деформації наповнювача під дією сили тертя та його подальшого «розтікання» по поверхні. Така поведінка свідчить про активну участь РТФЕ у формуванні захисного шару, який знижує інтенсивність контактних навантажень та сприяє стабілізації трибологічних характеристик.

При великому збільшенні можна спостерігати волокнисті структури — мікрофібрили РТФЕ. Їхня наявність підтверджує, що матеріал не просто зазнає зносу, а активно перебудовує поверхневий шар, утворюючи захисну плівку з волокнистою морфологією. Така плівка виконує роль антифрикційного бар'єра, що мінімізує адгезійну складову тертя та забезпечує довготривалу стабільність роботи композиту.

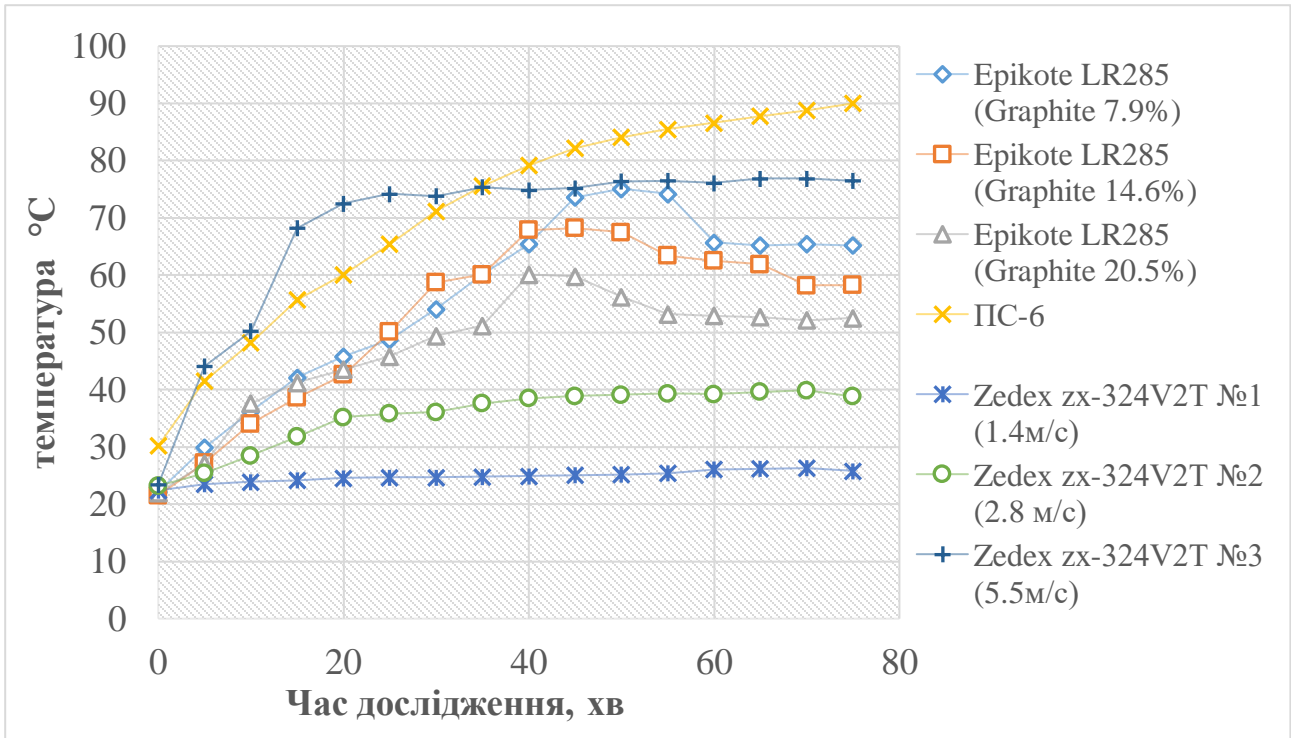


Рис. 4.4. Кінетика температурних полів у зоні фрикційного контакту композиційних матеріалів.

Важливою особливістю є відсутність виражених дефектів, таких як мікрорізання чи виривання часток (pitting), які зазвичай спостерігаються у менш стійких полімерних системах. Це свідчить про високий рівень структурної досконалості та підтверджує належність матеріалу до класу високоефективних промислових композитів типу Zedex. Таким чином, мікрофотографії демонструють не лише морфологічні особливості поверхні після тертя, але й підтверджують здатність системи РЕЕК+РТФЕ реалізовувати механізми адаптивного самозахисту, що забезпечують її виняткову трибологічну стабільність.

Таким чином, результати досліджень підтверджують, що термопластичні системи, на відміну від реактопластичних, володіють вираженим потенціалом до адаптивного зміцнення під дією триботехнічних навантажень. Це відкриває перспективи їхнього застосування у високонавантажених вузлах тертя, де критичною є здатність матеріалу не лише протидіяти деградації, але й реалізовувати механізми самозміцнення, що забезпечують підвищену довговічність та стабільність експлуатаційних характеристик. Мікрофотографії (рис. 4.3.) поверхні композиту РЕЕК+PTFE після тертя демонструють не лише морфологічні особливості, але й підтверджують здатність системи реалізовувати механізми адаптивного самозахисту, що проявляються у формуванні захисного шару та забезпечують її виняткову трибологічну стабільність.

Аналіз кінетики температурної напруженості в зоні фрикційного контакту дозволяє встановити фундаментальні закономірності дисипації енергії тертя, що є критично важливим для розуміння процесів самоорганізації досліджуваних систем. Згідно з отриманими графічними залежностями, встановлено, що динаміка нагріву експериментальних епоксиграфітових композитів на базі Epikote LR285 суттєво залежить від масової частки наповнювача. Характерною особливістю для цієї групи матеріалів є досягнення пікових значень температури з наступним виходом на відносно плато або навіть незначним зниженням термічних показників після 40–55 хвилини випробувань. Таке явище свідчить про досягнення стану динамічної рівноваги між процесами теплогенерації та тепловідведення. Формування стабільного плато на температурних кривих вказує на завершення періоду припрацювання та утворення на робочих поверхнях стабільної вторинної структури у вигляді ювенільної графітової плівки. Зниження температури після піку для зразка з вмістом графіту 20.5 % пояснюється інтенсивним «намазуванням» графіту на сталеве контртіло, що суттєво знижує коефіцієнт тертя та, як наслідок, питому потужність теплових потоків. Більш високий вміст графіту забезпечує не лише антифрикційний ефект, а й підвищує інтегральну теплопровідність композиту, що дозволяє системі стабілізуватися при

нижчих абсолютних температурах (близько 52 °С) порівняно зі зразком з 7.9 % графіту, де температура досягала 75 °С.

Поряд із зазначеними системами, специфічну кінетику термічних полів демонструє графітонаповнений композит ПС-6 (на базі полістиролу). На відміну від епоксидних матриць, температурна крива для ПС-6 не виявляє схильності до формування стабільного плато, характеризуючись безперервним і практично лінійним зростанням протягом усього циклу випробувань (до 75 хвилин). Пікове значення температури для даного матеріалу досягло 88.8 °С, що є найвищим показником серед досліджуваної групи композитів при аналогічних режимах. Такий характер нагріву безпосередньо зумовлений поєднанням аномально низької теплопровідності пористої структури пінополістиролу (0.0309 Вт/(м×К)) з інтенсивним тепловиділенням через адгезійну взаємодію. Теплота акумулюється в тонкому поверхневому шарі, не встигаючи дисипувати в об'єм зразка. Проте, зіставлення цієї термічної динаміки з раніше встановленим ефектом зміцнення доріжки тертя ( $\Delta H = 64$  МПа) та низьким ваговим зносом доводить, що зафіксований високий нагрів є активаційним фактором для процесів орієнтаційної кристалізації та механічного ущільнення макромолекул полістиролу під дією зсувних напружень. Це дозволяє класифікувати ПС-6 як матеріал із високою термо-активованою адаптивною здатністю, де теплова енергія тертя використовується як ресурс для структурної самоорганізації, незважаючи на відсутність видимого теплового балансу на графіку.

Окрему увагу в контексті термодинамічної стабільності заслуговує промисловий композит Zedex ZX-324 V2T. При варіації швидкості ковзання від 1.4 до 5.5 м/с цей матеріал продемонстрував найвищу здатність до стабілізації теплового режиму. При низьких швидкостях температурна крива має виражений лінійний характер з мінімальним градієнтом зростання, тоді як при критичній швидкості 5.5 м/с спостерігається інтенсивний нагрів у перші 20 хвилин з подальшою жорсткою стабілізацією на рівні 76.9 °С. Така ефективність термічного регулювання пояснюється унікальною синергією РЕЕК-матриці та РТФЕ-наповнювача. Висока термостійкість

полієфірефіркетону дозволяє матеріалу зберігати механічну жорсткість при нагріванні, що запобігає катастрофічному зростанню площі фактичного контакту, а легка міграція фторопласту забезпечує миттєве формування антифрикційної плівки. Саме швидке формування цієї плівки «відсікає» подальше зростання температури, створюючи трибологічний бар'єр, який утримує систему в межах безпечної експлуатації. На відміну від епоксидних композитів, де спостерігається знеміцнення поверхні через термічну деструкцію, система РЕЕК+ РТФЕ використовує енергію нагріву для активації структурної адаптації, що підтверджується кореляційними зв'язками між термічною напруженістю та зростанням мікротвердості доріжки тертя.

Таблиця 4.2

**Динаміка фрикційної взаємодії композиційних систем в умовах сухого тертя**

Матеріал / Час (хв)	0 (пуск)	5	15	25	35	45	55	65	75 (фініш)
<b>Epikote LR285 (Gr 7.9%)</b>	0.32	0.35	0.38	0.37	0.35	0.33	0.31	0.3	<b>0.29</b>
<b>Epikote LR285 (Gr 14.6%)</b>	0.28	0.3	0.33	0.32	0.29	0.27	0.25	0.24	<b>0.23</b>
<b>Epikote LR285 (Gr 20.5%)</b>	0.25	0.28	0.3	0.29	0.26	0.22	0.2	0.19	<b>0.18</b>
<b>ПС-6 (Графітонаповнений)</b>	0.26	0.29	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.35	<b>0.36</b>
<b>zx-324V2T №1 (1.4м/с)</b>	0.15	0.13	0.11	0.1	0.09	0.08	0.08	0.07	<b>0.07</b>
<b>zx-324V2T №2 (2.8м/с)</b>	0.13	0.12	0.11	0.1	0.09	0.08	0.07	0.07	<b>0.06</b>
<b>zx-324V2T №3 (5.5м/с)</b>	0.2	0.22	0.24	0.21	0.17	0.15	0.14	0.13	<b>0.13</b>

Отримані результати підтверджують гіпотезу про те, що управління температурною напруженістю через оптимізацію складу композиту є необхідною

умовою для переходу від режиму теплової деградації до режиму адаптивного зміцнення. Для епоксиграфітових систем виявлене температурне плато слугує індикатором ефективності графітового екрана, тоді як для Zedex ZX-324 V2T воно є свідченням формування високостабільної трибосистеми, здатної до саморегулювання навіть при інтенсивних швидкісних режимах. Ці закономірності складають фізико-хімічне підґрунтя для прогнозування ресурсу підшипників ковзання, де стабільність температурного плато прямо корелює з довговічністю вузла тертя.

Таблиця 4.2

**Динаміка фрикційної взаємодії композиційних систем в умовах сухого тертя**

Матеріал / Час (хв)	0 (пуск)	5	15	25	35	45	55	65	75 (фініш)
<b>Epikote LR285 (Gr 7.9%)</b>	0.32	0.35	0.38	0.37	0.35	0.33	0.31	0.3	<b>0.29</b>
<b>Epikote LR285 (Gr 14.6%)</b>	0.28	0.3	0.33	0.32	0.29	0.27	0.25	0.24	<b>0.23</b>
<b>Epikote LR285 (Gr 20.5%)</b>	0.25	0.28	0.3	0.29	0.26	0.22	0.2	0.19	<b>0.18</b>
<b>ПС-6 (Графітонаповнений)</b>	0.26	0.29	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.35	<b>0.36</b>
<b>zx-324V2T №1 (1.4м/с)</b>	0.15	0.13	0.11	0.1	0.09	0.08	0.08	0.07	<b>0.07</b>
<b>zx-324V2T №2 (2.8м/с)</b>	0.13	0.12	0.11	0.1	0.09	0.08	0.07	0.07	<b>0.06</b>
<b>zx-324V2T №3 (5.5м/с)</b>	0.2	0.22	0.24	0.21	0.17	0.15	0.14	0.13	<b>0.13</b>

Аналіз динаміки коефіцієнта тертя ( $f$ ) досліджуваних полімерних композитів дозволяє встановити глибинні зв'язки між триботехнічними характеристиками та

процесами структурної адаптації поверхонь. Згідно з експериментальними даними, поведінка кожної групи матеріалів відображає специфіку формування вторинних структур та перерозподілу енергії в зоні контакту. Для серії експериментальних епоксиграфітових композитів на базі Epikote LR285 характерною закономірністю є наявність вираженого піку коефіцієнта тертя на 15-й хвилині випробувань, що відповідає завершенню перехідного періоду припрацювання. У цей інтервал значення досягають максимуму (0.38 для зразка з 7.9 % графіту та 0.30 для 20.5 % графіту) через інтенсивну механічну взаємодію мікронерівностей та високу адгезійну складову тертя. Подальше стійке зниження коефіцієнта тертя до кінця циклу випробувань (до 0.29 та 0.18 відповідно) графічно корелює з виходом температурних кривих на плато. Це підтверджує механізм самозмащування: при досягненні певного термічного порогу відбувається інтенсивний вихід графіту з матриці та формування ювенільної антифрикційної плівки на сталевому контртілі. Чітко простежується ефект: збільшення вмісту графіту не лише знижує абсолютне значення тертя, а й забезпечує більш ранню стабілізацію трибосистеми.

Принципово інша закономірність спостерігається для композиту ПС-6, де зафіксовано безперервне лінійне зростання коефіцієнта тертя від 0,26 на пуску до 0,36 на фінальному етапі. Такий характер кривої пояснюється особливостями аморфної полістирольної матриці. Постійне зростання тертя призводить до акумуляції теплоти, що, як було встановлено раніше, є необхідним енергетичним ресурсом для орієнтаційного зміцнення ПС-6. У даному випадку високий рівень фрикційної взаємодії є активатором структурної адаптації, де механічна робота тертя конвертується в ріст мікротвердості поверхневого шару, попри відсутність вираженого антифрикційного ефекту від графітового наповнювача в даній системі.

Найбільш досконалу триботехнічну відповідь демонструє промисловий стандарт Zedex zx-324V2T. При помірних швидкостях (1.4–2.8 м/с) матеріал виявляє стабільно низькі значення  $f$  (0.06–0.07), що свідчить про домінування гідродинамічних ефектів у твердому змащувальному шарі PTFE. У режимі критичного навантаження (5.5 м/с)

спостерігається початкове зростання тертя до 0.24 з наступним динамічним зниженням до 0.13. Така «куполоподібна» траєкторія зміни коефіцієнта тертя є прямим доказом високої адаптивності системи РЕЕК+PTFE. Різке після 25-ї хвилини при швидкості 55 м/с є трибологічним бар'єром, який зупиняє подальший розігрів вузла, стабілізуючи температуру на рівні 76.9 °С та забезпечуючи мінімальний ваговий знос.

#### **4.3 Кореляційний аналіз взаємозалежності термічних режимів, структурних трансформацій та триботехнічних характеристик поверхонь**

Проведений статистичний аналіз результатів триботехнічних випробувань дозволив виявити закономірності взаємозв'язку між енергетичними параметрами фрикційного контакту та структурною відповіддю полімерних композитів. На основі експериментальних даних встановлено, що коефіцієнт кореляції між максимальною температурою контакту  $T_{max}$  та показником зміцнення  $K_h$  становить 0.77. Таке високе позитивне значення свідчить про те, що для сучасних антифрикційних композитів температурна напруженість виступає не лише деструктивним чинником, а й активатором структурної перебудови. Зростання температури в зоні тертя забезпечує необхідну термодинамічну енергію для орієнтації макромолекул та вторинної кристалізації, що особливо виразно проявляється у матеріалах серії Zedex та модифікованого ПС-6. У цих системах теплота тертя конвертується у механічну роботу зміцнення поверхневого шару, перетворюючи потенційно руйнівний фактор на ресурс підвищення несучої здатності.

Отже, виявлена кореляційна залежність підтверджує правомірність концепції «активаційного нагріву», де термічний вплив стає керованим чинником самоорганізації трибосистеми. Це дозволяє забезпечити динамічну стабільність фрикційних характеристик та суттєво розширити діапазон експлуатаційної придатності полімерних вузлів тертя без ризику їхнього передчасного термомеханічного руйнування

Практичне значення встановленої залежності полягає у можливості цілеспрямованого керування тепловими процесами для оптимізації ресурсу полімерних

композитів. Це відкриває перспективи розробки матеріалів із прогнозованими характеристиками, здатних забезпечувати стабільність роботи у високонавантажених авіаційних та машинобудівних трибосистемах.

Таблиця 4.3

**Параметри структурної адаптації та температурної напруженості антифрикційних композиційних систем у процесі фрикційної взаємодії**

Матеріал	Максимальна темп. контакту $T_{\max}$ °C	Коефіцієнт зміцнення $K_h$	Площа контакту $A$ мм <sup>2</sup>	Інтенсивність вагвого зносу $I_g$ г/(Н*с*мм <sup>2</sup> )
Epikote LR285 (Gr 7.9%)	75.1	-0.52	5.01E-05	1.52E-02
Epikote LR285 (Gr 14.6%)	68.2	-0.43	5.12E-05	1.20E-02
Epikote LR285 (Gr 20.5%)	60.1	-0.33	5.07E-05	5.91E-03
ПС-6 (Графітонаповнений)	90	0.37	4.96E-05	1.13E-03
zx-324V2T №1 (1.4м/с)	26.3	0.02	5.03E-05	6.37E-04
zx-324V2T №2 (2.8м/с)	39.9	0.40	5.07E-05	4.85E-04
zx-324V2T №3 (5.5м/с)	76.9	0.57	5.01E-05	1.52E-02

Водночас аналіз виявив суттєву дивергенцію в поведінці різних полімерних матриць. Для епоксидних композитів на основі Epikote LR285 зафіксовано протилежну тенденцію: зростання температури до пікових значень ініціює процеси термомеханічної

деструкції, що проявляється у від'ємних значеннях  $K_h$ . Таким чином, загальний коефіцієнт кореляції 0.77 відображає інтегральну здатність композиційних систем до теплової активації, проте межа між адаптацією та деградацією визначається хімічною природою матриці та ефективністю наповнювача. Це доводить, що оптимізація вмісту графіту є критично важливим інструментом для утримання трибосистеми у зоні позитивного зміцнення, де енергія нагріву стимулює формування захисного фрикційного наклепу.

Найбільш значущим результатом для підтвердження робочої гіпотези є встановлений коефіцієнт кореляції між показником зміцнення  $K_h$  та інтенсивністю вагового зносу  $I_g$ , який становить -0,89. За шкалою Чеддока це відповідає сильному зворотному зв'язку, що математично означає: понад 79% варіації зносостійкості досліджуваних матеріалів безпосередньо визначається їхньою здатністю до структурної адаптації. Сильний від'ємний зв'язок доводить, що кожне збільшення мікротвердості доріжки тертя призводить до пропорційного зниження швидкості руйнування поверхні. Це дозволяє розглядати коефіцієнт  $K_h$  як надійний предиктивний індикатор ресурсу: матеріали, що демонструють позитивне зміцнення, автоматично переходять у режим мінімального зношування завдяки формуванню стабільного енергетичного бар'єра вторинних структур.

Систематизація отриманих кореляційних залежностей дала змогу сформулювати узагальнену концепцію триботехнічної надійності композиційних матеріалів. У межах цієї концепції теплова напруженість розглядається як пусковий фактор, що активує перебудову поверхневих шарів, тоді як процеси фрикційного зміцнення виступають основним механізмом стабілізації та підвищення довговічності. Встановлені закономірності свідчать, що мінімізація інтенсивності зношування у підшипниках ковзання досягається не лише завдяки зниженню коефіцієнта тертя, а передусім через створення умов для керованої структурної адаптації.

Отримані результати формують наукову основу для розробки нових антифрикційних композитів, у яких оптимальний баланс між теплопровідністю

наповнювача та здатністю полімерної матриці до вторинної кристалізації забезпечує високий опір руйнуванню в широкому діапазоні експлуатаційних навантажень. Таким чином, перспективність сучасних композиційних систем визначається не лише їхньою початковою міцністю, а й здатністю ефективно трансформувати енергію тертя у ресурс зміцнення, що відкриває шлях до створення матеріалів нового покоління з підвищеною триботехнічною надійністю.

#### **Висновки до розділу 4.**

1. Обґрунтовано та реалізовано методологію порівняльного аналізу триботехнічної ефективності трьох класів композиційних систем: високотехнологічного промислового стандарту (Zedex ZX-324 V2T), масового антифрикційного термопласту (ПС-6) та розроблених експериментальних епоксиграфітових композитів на базі смоли Epikote LR285.

2. Встановлено, що введення дисперсного графіту в епоксидну матрицю ініціює механізм термічної стабілізації вузла тертя. Збільшення концентрації наповнювача з 7.9 % до 20.5 % дозволяє знизити рівень фрикційного знеміцнення поверхні утричі (зі 183 МПа до 61 МПа), що зумовлено формування первинної графітової трибоплівки, яка виконує роль теплового демпфера та антифрикційного екрана.

3. Експериментальні результати підтвердили високий адаптивний потенціал матеріалу Zedex ZX-324 V2T. За умов інтенсивного швидкісного навантаження (5.5 м/с) він демонструє характерну «куполоподібну» динаміку коефіцієнта тертя, коли після стадії припрацювання відбувається його поступове зниження. Така поведінка забезпечує стабілізацію температурного плато на рівні 76.9 °С, що ефективно запобігає термомеханічній деструкції та істотно зменшує ваговий знос. Таким чином, матеріал перетворює енергію тертя на ресурс для підтримання структурної цілісності поверхневого шару, демонструючи приклад керованої адаптації у складних експлуатаційних умовах.

4. Виявлено специфічну термо-активовану поведінку композиту ПС-6, де, попри відсутність теплового балансу та безперервне зростання температури до 88.8 °С, зафіксовано приріст мікротвердості доріжки тертя на 64 МПа. Це доводить, що для певних аморфно-кристалічних систем тепла енергія тертя може бути конвертована у ресурс зміцнення через механізми орієнтаційної перебудови макромолекул.

5. За допомогою кореляційного аналізу математично обґрунтовано концепцію «активаційного нагріву». Встановлений високий позитивний зв'язок ( $r = 0.77$ ) між максимальною температурою  $T_{\max}$  та показником зміцнення  $K_h$  доводить, що термічна напруженість у сучасних антифрикційних системах є пусковим чинником структурної адаптації, а не лише фактором руйнування.

6. Отримані результати підтверджують фундаментальну роль процесів фрикційного зміцнення у забезпеченні довговічності вузлів тертя. Встановлений сильний зворотний кореляційний зв'язок ( $r = -0.89$ ) між коефіцієнтом зміцнення  $K_h$  та інтенсивністю вагового зносу  $I_g$  свідчить, що понад 79% варіації зносостійкості безпосередньо визначається здатністю матеріалу до формування захисного наклепу на робочих поверхнях. Така закономірність доводить, що підвищення мікротвердості поверхневого шару є ключовим індикатором ресурсу, оскільки кожне зростання  $K_h$  супроводжується пропорційним зниженням швидкості руйнування. Таким чином, фрикційне зміцнення виступає не лише локальним ефектом, а й системним механізмом стабілізації трибосистеми, що забезпечує її довготривалу працездатність.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Систематизовано та класифіковано сучасну номенклатуру полімерних матриць за їхньою функціональною роллю у формуванні трибологічного ресурсу, виділивши групу високопродуктивних систем на основі РЕЕК та PTFE. Обґрунтовано перспективність комбінування цих полімерів, де поєднання виняткової термостійкості та механічної міцності полієфірефіркетону (РЕЕК) з низьким коефіцієнтом тертя політетрафторетилену (PTFE) забезпечує синергетичний ефект. Це дозволяє створювати композити, здатні зберігати структурну цілісність та стабільні антифрикційні властивості у критичних режимах експлуатації, недоступних для стандартних інженерних термопластів.

2. Обґрунтовано вибір реактопластичної матриці (смола Epikote LR285) та антифрикційних термопластів (Zedex, модифіковані поліаміди) як базису для високонавантажених вузлів. На основі аналізу міжнародних стандартів доведено релевантність схеми випробувань «блок-на-кільці», яка в поєднанні з розробленою прецизійною системою моніторингу на базі сенсорів Pt100 (ITS-90), забезпечує високу достовірність моделювання реальних умов роботи підшипників ковзання.

3. Створено та валідовано оригінальну трибометричну установку. Розроблено комплексну методику, що інтегрує контактну термометрію, безконтактну пірометрію та лазерну профілометрію, що дозволило з високою роздільною здатністю верифікувати температурні градієнти та еволюцію мікрогеометрії поверхонь без деструктивного впливу на в'язкопружну матрицю.

4. Встановлено фундаментальну роль процесів фрикційного зміцнення у забезпеченні довговічності трибосистем. Виявлений сильний зворотний кореляційний зв'язок ( $r = -0.89$ ) між показником  $K_h$  та інтенсивністю вагового зносу  $I_g$  доводить, що понад 79% варіацій зносостійкості визначається здатністю матеріалу до формування захисного наклепу. Це дозволяє використовувати динаміку мікротвердості як надійний предиктивний індикатор ресурсу композитів.

5. Виявлено та експериментально підтверджено ефект «термічного плато» для високонавантажених систем (Zedex ZX-324 V2T, епоксиграфіти). Доведено, що самочинна стабілізація температури відбувається завдяки динамічному зниженню коефіцієнта тертя внаслідок формування вторинних антифрикційних структур (трибоплівок), які виконують роль теплового демпфера та екрана.

6. Математично обґрунтовано концепцію «активаційного нагріву», згідно з якою термічна напруженість ( $r = 0.77$  з  $K_h$ ) виступає не лише фактором руйнування, а й пусковим чинником структурної адаптації. Встановлено, що для аморфно-кристалічних систем (Zedex-100k, ПС-6, PET) тепла енергія тертя може бути конвертована у ресурс зміцнення через механізми орієнтаційної перебудови макромолекул та вторинної кристалізації.

7. Визначено діапазон оптимальних швидкісних режимів (в околі 2.8 м/с), за яких спостерігається максимальне згладжування мікронерівностей (зниження  $R_a$  до 0.003 мкм) та зростання несучої здатності поверхні до 71% (згідно з кривою Аббота-Файерстоуна). Доведено, що вихід за ці межі ініціює перехід до термічного зношування з падінням опорної здатності у 1.9 раза.

8. Доведено ефективність комбінованого наповнення (графітом та змащувальними компонентами) для стабілізації теплового балансу. Введення змащувальних добавок у поліамідну матрицю (SusTamid 6G OL) дозволяє знизити момент тертя на 17.5% та обмежити пікову температуру контакту рівнем 60 °С, що повністю виключає ризик теплової деструкції, характерної для немодифікованих полімерів (Sustapei).

9. Запропоновано класифікацію антифрикційних матеріалів за їхньою адаптивною здатністю. Виділено групу термодинамічно стабільних систем, здатних підтримувати структурну цілісність у широкому діапазоні швидкостей (1.4–5.5 м/с), що складає наукову основу для проектування високонавантажених композиційних підшипників нового покоління.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Effect of Polyamide 66 on the Mechanical and Thermal Properties of Post-Industrial Waste Polyamide 6 / H. Ghasemi et al. // *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2014. Vol. 53, no. 17. P. 1794–1803. URL: <https://doi.org/10.1080/03602559.2014.935398>
2. Xu J., Li J., He B., et al. Surface structure and properties of water-based polymer coating materials prepared by the complexation of two polymer latices with chemically complementary structures // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2006. – Vol. 101, iss. 1. – P. 116–124. – DOI: <https://doi.org/10.1002/app.23378>.
3. Benabdallah S. M. H., Yelle H. Static and quasi-dynamic coefficient of friction of three engineering thermoplastics: UHMWPE, PA 66, POM // *Journal of Materials Science*. – 1991. – Vol. 26. – P. 2445–2450. – DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01130194>.
4. Rudresh B. M., Ravikumar B. N., Madhu D. Dry sliding friction and wear behavior of hybrid glass–carbon fiber reinforced PA66/PTFE composites // *Tribologia – Finnish Journal of Tribology*. – 2020. – Vol. 37, No. 1–2. – P. 15–25. – DOI: <https://doi.org/10.30678/fjt.88615>.
5. Evstatiev M. et al. In situ polymer/polymer composites from poly(ethylene terephthalate), polyamide-6, and polyamide-66 blends / M. Evstatiev, S. Fakirov, B. Krasteva, K. Friedrich, J. M. Schultz. *Journal of Applied Polymer Science*. 1998. Vol. 67, iss. 4. P. 723–737. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-4628\(19980124\)67:4%3C723::aid-app15%3E3.0.co;2-s](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-4628(19980124)67:4%3C723::aid-app15%3E3.0.co;2-s)
6. Sayer S. Mechanical Performance of Polyamid 66 and Influence of Glass Fiber Content on Moisture Absorption / S. Sayer. *Materials Testing*. 2014. Vol. 56, iss. 4. P. 325–330. DOI: <https://doi.org/10.3139/120.0558>
7. Eriksson P.-A. et al. Effect of thermal-oxidative aging on mechanical, chemical, and thermal properties of recycled polyamide 66 / P.-A. Eriksson, P. Boydell, K. Eriksson, J.-A. E. Månson, A.-C. Albertsson. *Journal of Applied Polymer Science*. 1997. Vol. 65, iss. 8. P. 1619–1630. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-4628\(19970822\)65:8%3C1619::aid-app18%3E3.0.co;2-q](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-4628(19970822)65:8%3C1619::aid-app18%3E3.0.co;2-q)

8. Florent A. et al. Effect of severe thermo-oxidative aging on the mechanical behavior and fatigue durability of short glass fiber reinforced PA6/6.6 / A. Florent, C. Robert, V. Bellenger, B. Fayolle. *International Journal of Fatigue*. 2022. Vol. 165. P. 107280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107280>
9. Chernets M. et al. Investigation of Wear Resistance of Polyamide PA6 Based Composite Materials for Metal - Polymer Plain Bearings and Gears / M. Chernets, J. P. Davim, S. S. Kumaran, S. J. Sekhar. *Tribology in Industry*. 2023. Vol. 45, iss. 4. P. 643–649. DOI: <https://doi.org/10.24874/ti.1526.07.23.09>
10. Yu S. et al. Effect of rubber on tribological behaviors of polyamide 66 under dry and water lubricated sliding / S. Yu, H. Hu, J. Yin. *Wear*. 2008. Vol. 265, iss. 3-4. P. 361–366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.11.006>
11. Graln N. et al. A Contribution to the Knowledge of Some Physico-chemical Properties of Polystyrene / N. Graln, G. Lagermalm. *The Journal of Physical Chemistry*. 1952. Vol. 56, iss. 4. P. 514–523. DOI: <https://doi.org/10.1021/j150496a025>
12. Clegg D. W. et al. Extrusion and injection moulding properties of glass-filled polystyrene / D. W. Clegg, A. A. Collyer, N. C. Griffin. *Polymer*. 1980. Vol. 21, iss. 12. P. 1360–1362. DOI: [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(80\)90131-7](https://doi.org/10.1016/0032-3861(80)90131-7)
13. Gilardi R. Tribology of Graphite-Filled Polystyrene / R. Gilardi. *Lubricants*. 2016. Vol. 4, iss. 2. P. 20. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants4020020>
14. Wang Y. et al. In-situ formation of nitrogen doped microporous carbon nanospheres derived from polystyrene as lubricant additives for anti-wear and friction reduction / Y. Wang, L. Zhang, J. Liu, X. Fan. *Friction*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-023-0766-2>
15. Bismarck A. et al. Polystyrene-grafted Carbon Fibers: Surface Properties and Adhesion to Polystyrene / A. Bismarck, R. Wäsche, J. Springer. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2005. Vol. 18, iss. 4. P. 307–331. DOI: <https://doi.org/10.1177/0892705705049559>

16. Krause P. et al. Experimental Studies Involving the Impact of Solar Radiation on the Properties of Expanded Graphite Polystyrene / P. Krause, A. Nowoświat. *Energies*. 2019. Vol. 13, iss. 1. P. 75. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13010075>
17. Yourtee J. B., Cooper S. L. Properties of densified amorphous polystyrene // *Journal of Applied Polymer Science*. – 1974. – Vol. 18, no. 3. – P. 897–912. – DOI: <https://doi.org/10.1002/app.1974.070180323>.
18. *Stretch Blow Molding*. – Elsevier, 2012. – DOI: <https://doi.org/10.1016/c2011-0-00034-0>.
19. Gomes J. R., et al. The effect of sliding speed and temperature on the tribological behaviour of carbon–carbon composites // *Wear*. – 2001. – Vol. 249, no. 3–4. – P. 240–245. – DOI: [https://doi.org/10.1016/s0043-1648\(01\)00554-3](https://doi.org/10.1016/s0043-1648(01)00554-3).
20. Bahadur S. The development of transfer layers and their role in polymer tribology // *Wear*. – 2000. – Vol. 245, no. 1–2. – P. 92–99. – DOI: [https://doi.org/10.1016/s0043-1648\(00\)00469-5](https://doi.org/10.1016/s0043-1648(00)00469-5).
21. Wang X., et al. Creep behavior and mechanical properties of isotactic polypropylene composites via twice melt injection molding // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. – 2019. – Vol. 2, no. 3. – P. 102–109. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.06.001>.
22. Synthesis of SiO<sub>2</sub> nanoparticles and their effect on polystyrene: structural analysis // *BSU-Journal of Physics & Space Sciences*. – 2025. – DOI: <https://doi.org/10.30546/209501.101.2025.2.300.012>.
23. Khun N. W., Liu E. Effects of mechanical strength, working temperature and wax lubricant on tribological behavior of polystyrene // *Journal of Polymer Engineering*. – 2016. – Vol. 36, no. 7. – P. 723–733. – DOI: <https://doi.org/10.1515/polyeng-2015-0253>.
24. Gangineri Padmanaban A., et al. Ultrahigh-Strain-Rate Mechanical Properties of Polystyrene near the Glass Transition Temperature // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15, no. 12. – P. 6663. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app15126663>.

25. Ji L. N. Study on Preparation Process and Properties of Polyethylene Terephthalate (PET) // *Applied Mechanics and Materials*. – 2013. – Vol. 312. – P. 406–410. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.312.406>.
26. Di Lorenzo M. L. Crystallization of Poly(ethylene terephthalate): A Review // *Polymers*. – 2024. – Vol. 16, no. 14. – P. 1975. – DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16141975>.
27. Lee J. H., et al. Effect of pretreatment conditions on the hydrolysis and water absorption behavior of poly(ethylene terephthalate) fibrous assembly // *Polymer International*. – 2011. – Vol. 61, no. 4. – P. 657–663. – DOI: <https://doi.org/10.1002/pi.3229>.
28. Martin I., et al. Advanced Thermoplastic Composite Manufacturing by In-Situ Consolidation: A Review // *Journal of Composites Science*. – 2020. – Vol. 4, no. 4. – P. 149. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs4040149>.
29. Davim J. P., Cardoso R. Tribological behaviour of the composite PEEK-CF30 at dry sliding against steel using statistical techniques // *Materials & Design*. – 2006. – Vol. 27, no. 4. – P. 338–342. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.11.006>.
30. Influence of contact pressure and sliding speed on the temperature and coefficient of friction in sliding contact between two PET samples // *Tehnicki vjesnik – Technical Gazette*. – 2016. – Vol. 23, no. 2. – DOI: <https://doi.org/10.17559/tv-20151124163215>.
31. Eutionnat-Diffo P. A., et al. Study of the Wear Resistance of Conductive Poly Lactic Acid Monofilament 3D Printed onto Polyethylene Terephthalate Woven Materials // *Materials*. – 2020. – Vol. 13, no. 10. – P. 2334. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13102334>.
32. Reis J. M. L., et al. Effect of recycled PET in the fracture mechanics of polymer mortar // *Construction and Building Materials*. – 2011. – Vol. 25, no. 6. – P. 2799–2804. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.056>.
33. Di Lorenzo M. L. Crystallization of Poly(ethylene terephthalate): A Review // *Polymers*. – 2024. – Vol. 16, no. 14. – P. 1975. – DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16141975>.
34. Nisticò R. Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry // *Polymer Testing*. – 2020. – Vol. 90. – P. 106707. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106707>.

35. Filippova E., et al. Sterilization influence on PET track membrane properties // *PROSPECTS OF FUNDAMENTAL SCIENCES DEVELOPMENT (PFSD-2016): Proceedings of the XIII International Conference of Students and Young Scientists, Tomsk, Russia.* – 2016. – DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4964531>.

36. Gu H. Comparison between laminated and integrated glass fibre reinforced plastics // *Materials & Design.* – 2000. – Vol. 21, no. 5. – P. 461–464. – DOI: [https://doi.org/10.1016/s0261-3069\(00\)00004-2](https://doi.org/10.1016/s0261-3069(00)00004-2).

37. Maloo L. M., et al. A Sneak Peek Toward Polyaryletherketone (PAEK) Polymer: A Review // *Cureus.* – 2022. – DOI: <https://doi.org/10.7759/cureus.31042>.

38. Perng L. H., Tsai C. J., Ling Y. C. Mechanism and kinetic modelling of PEEK pyrolysis by TG/MS // *Polymer.* – 1999. – Vol. 40, no. 26. – P. 7321–7329. – DOI: [https://doi.org/10.1016/s0032-3861\(99\)00006-3](https://doi.org/10.1016/s0032-3861(99)00006-3).

39. Seenath A. A., et al. A Comprehensive Review on the Tribological Evaluation of Polyether Ether Ketone Pristine and Composite Coatings // *Polymers.* – 2024. – Vol. 16, no. 21. – P. 2994. – DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16212994>.

40. Products S. S. Polyetheretherketone (PEEK): Product Data Sheet. – URL: <https://asset.sspseals.com/documents/peek%20SSP.pdf> (дата звернення: 21.03.2024).

41. Sariyev B., et al. Thermal, hardness, and tribological assessment of PEEK/CoCr composites // *Scientific Reports.* – 2025. – Vol. 15, no. 1. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14776-5>.

42. Authors V. Introduction of carbon fibers (to increase loadbearing capacity) in combination with solid lubricating fillers (PTFE, graphite, MoS<sub>2</sub>). – Springer, 2016. – URL: <https://books.google.com.ua/books?id=VL9rDAAAQBAJ> (дата звернення: 12.09.2024).

43. Luo C., et al. PEEK for Oral Applications: Recent Advances in Mechanical and Adhesive Properties // *Polymers.* – 2023. – Vol. 15, no. 2. – P. 386. – DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15020386>.

44. Pope J. C., et al. High-temperature steam-treatment of PBI, PEEK, and PEKK polymers with H<sub>2</sub>O and D<sub>2</sub>O: A solid-state NMR study // *Polymer*. – 2014. – Vol. 55, no. 18. – P. 4577–4585. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2014.07.027>.

45. Zhang X., et al. Study on the Friction and Wear Properties of PEEK Against Cortical Bone Tissue Under Different Lubricating Conditions // *Macromolecular Bioscience*. – 2023. – P. 2200548. – DOI: <https://doi.org/10.1002/mabi.202200548>.

46. Kumar A., et al. Synthesis and Properties of Poly(N-isopropylacrylamide) Gels: Effect of Crosslinking Agents // *Macromolecules*. – 1996. – Vol. 29, no. 21. – P. 6812–6817. – DOI: <https://doi.org/10.1021/ma9603589>.

47. Bassett D., Olley R., Alraheil I. On crystallization phenomena in PEEK // *Polymer*. – 1988. – Vol. 29, no. 10. – P. 1745–1754. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(88\)90386-2](https://doi.org/10.1016/0032-3861(88)90386-2).

48. Roa S., Sirena M. Size effects on the optimization of the mechanical resistance and the electrical conductivity of Cu thin films // *Materials Today Communications*. – 2021. – Vol. 28. – P. 102572. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102572>.

49. Wang R., Xu G., He Y. Structure and properties of polytetrafluoroethylene (PTFE) fibers // *e-Polymers*. – 2017. – Vol. 17, no. 3. – P. 215–220. – DOI: <https://doi.org/10.1515/epoly-2016-0059>.

50. Adeleke A. A., Samuel A. A., Ojo J. A. Analysis of experimental determination of friction coefficient for various materials // *Tribology Letters*. – 2015. – Vol. 60, no. 1. – P. 1–10. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-015-0529-y>.

51. Chun S., et al. Effect of thermal-oxidative aging on the chemical, physical and mechanical properties of PA66 // *Corrosion Science*. – 2023. – Vol. 219. – P. 111226. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111226>.

52. Katoueizaheh E., et al. Impact of sintering temperature and compression load on the crystallinity and structural ordering of polytetrafluoroethylene // *RSC Advances*. – 2025. – Vol. 15, no. 39. – P. 32746–32757. – DOI: <https://doi.org/10.1039/d5ra03395k>.

53. Deshwal D., Belgamwar S. U., Bekinal S. I. Tribological characterization of PTFE composites for ball bearing applications // *Cogent Engineering*. – 2024. – Vol. 11, no. 1. – DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2434625>.

54. Çaykara T., et al. Exploring the potential of polyethylene terephthalate in the design of antibacterial surfaces // *Medical Microbiology and Immunology*. – 2020. – Vol. 209, no. 3. – P. 363–372. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00430-020-00660-8>.

55. Sun G., et al. pH-Controllable cyclic threading/dethreading of polypseudorotaxane obtained from cyclodextrins and poly(amino ester) // *Polymer*. – 2005. – Vol. 46, no. 10. – P. 3355–3362. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.02.090>.

56. Wang Y., et al. Morphology and properties of poly(vinylidene fluoride)/silicone rubber blends // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2013. – Vol. 131, no. 4. – DOI: <https://doi.org/10.1002/app.39945>.

57. Terwisscha-Dekker H., et al. Why Teflon is so slippery while other polymers are not // *Physical Review E*. – 2023. – Vol. 107, no. 2. – DOI: <https://doi.org/10.1103/physreve.107.024801>.

58. Christakopoulos F., Troisi E., Tervoort T. A. Melting Kinetics of Nascent Poly(tetrafluoroethylene) Powder // *Polymers*. – 2020. – Vol. 12, no. 4. – P. 791. – DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12040791>.

59. Zhen J., et al. High Temperature Friction and Wear Behavior of PTFE/MoS<sub>2</sub> Composites // *Lubricants*. – 2023. – Vol. 11, no. 8. – P. 312. – DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants11080312>.

60. Ye J., Burriss D., Xie T. A Review of Transfer Films and Their Role in Ultra-Low-Wear Sliding of Polymers // *Lubricants*. – 2016. – Vol. 4, no. 1. – P. 4. – DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants4010004>.

61. Deshwal D., Belgamwar S. U., Bekinal S. I. Tribological characterization of PTFE composites for ball bearing applications // *Cogent Engineering*. – 2024. – Vol. 11, no. 1. – DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2434625>.

62. Wei Y., et al. Preparation of PVA Fluorescent Gel and Luminescence of Europium Sensitized by Terbium (III) // *Polymers*. – 2020. – Vol. 12, no. 4. – P. 893. – DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12040893>.

63. Addo Ntim S., et al. Consumer use effects on nanoparticle release from commercially available ceramic cookware // *Food Control*. – 2018. – Vol. 87. – P. 31–39. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.12.003>.

64. Dhanumalayan E., Joshi G. M. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE) – a review // *Advanced Composites and Hybrid Materials*. – 2018. – Vol. 1, no. 2. – P. 247–268. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s42114-018-0023-8>.

65. Hashimoto T., Sakaguchi T. POM (Polyoxymethylenes), Polyacetals // *Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials*. – Berlin, Heidelberg, 2014. – P. 1–7. – DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-36199-9\\_256-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-36199-9_256-1).

66. Reffas S. A., et al. Mechanical and Thermal Characterization of Polyoxymethylene: Strain Rate Sensitivity, Crystallinity and Failure Mechanisms // *Physics of the Solid State*. – 2025. – Vol. 67, no. 8. – P. 642–654. – DOI: <https://doi.org/10.1134/s1063783425601560>.

67. Bedoui F., Fayolle B. POM Mechanical Properties // *Polyoxymethylene Handbook*. – Hoboken, NJ, USA, 2014. – P. 241–255. – DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118914458.ch9>.

68. Stolarski P. J. Tribology of Polyetheretherketone (PEEK) // *Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials* / ed. by S. Kobayashi, K. Müllen. – Berlin, Heidelberg, 2021. – P. 1–9. – DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-36199-9\\_256-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-36199-9_256-1).

69. Masamoto J. Modern polyacetals // *Progress in Polymer Science*. – 1993. – Vol. 18, no. 1. – P. 1–84. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0079-6700\(93\)90003-u](https://doi.org/10.1016/0079-6700(93)90003-u).

70. Hsissou R., et al. Polymer composite materials: A comprehensive review // *Composite Structures*. – 2021. – Vol. 262. – P. 113640. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>.

71. Król-Morkisz K., et al. Thermal Stabilization of Polyoxymethylene by PEG-Functionalized Hydroxyapatite: Examining the Effects of Reduced Formaldehyde Release and

Enhanced Bioactivity // *Advances in Polymer Technology*. – 2019. – Vol. 2019. – P. 1–17. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/9728637>.

72. Czuppon A., Korecz L., Kall A. Crystallinity of POM films cast from solution // *Polymer Bulletin*. – 1987. – Vol. 17, no. 2. – DOI: <https://doi.org/10.1007/bf00256879>.

73. Krella A. Influence of cavitation intensity on X6CrNiTi18-10 stainless steel performance in the incubation period // *Wear*. – 2005. – Vol. 258, no. 11–12. – P. 1723–1731. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.11.025>.

74. Bedoui F., Fayolle B. POM Mechanical Properties // *Polyoxymethylene Handbook*. – Hoboken, NJ, USA, 2014. – P. 241–255. – DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118914458.ch9>.

75. Lüftl S., V. P. M., Chandran S. (eds.). *Polyoxymethylene Handbook*. – Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2014. – DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118914458>.

76. Wefa Press. POM (Polyoxymethylene): Technical Data Sheet. – URL: [https://wefapress.com/wp-content/uploads/2023/06/POM-data\\_sheet.pdf](https://wefapress.com/wp-content/uploads/2023/06/POM-data_sheet.pdf) (дата звернення: 17.12.2024).

77. Rémond Y., Védrines M. Measurement of local elastic properties of injection moulded polymer structures by analysis of flexural resonant frequencies. Applications in POM, PA66, filled PA 66 // *Polymer Testing*. – 2004. – Vol. 23, no. 3. – P. 267–274. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2003.08.005>.

78. Liu Q., et al. Tribological behavior and morphology of PTFE particulate-reinforced POM matrix composites // *Journal of Polymer Engineering*. – 2017. – Vol. 37, no. 3. – P. 227–237. – DOI: <https://doi.org/10.1515/polyeng-2016-0037>.

79. Li X., et al. Molecular dynamics study on friction of polymer material polyoxymethylene (POM) // *Journal of Polymer Engineering*. – 2024. – DOI: <https://doi.org/10.1515/polyeng-2023-0260>.

80. GmbH N.-G. POM Homo (Polyoxymethylene Homopolymer): Engineering Thermoplastics. – URL: <https://analyzing-testing.netzsch.com/en/polymers-netzsch->

звернення: 17.02.2025).

81. Jagannath J. H., et al. Mechanical and barrier properties of edible starch-protein-based films // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2003. – Vol. 88, no. 1. – P. 64–71. – DOI: <https://doi.org/10.1002/app.11602>.

82. Grünewald M., Sumpf J., Golder M. Oscillating tribological long-term investigations of PTFE and microcapsule filled POM // *Journal of Materials Science: Polymers*. – 2025. – Vol. 1, no. 1. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s44493-025-00004-z>.

83. Kneissl L. M., et al. Improving the Tribological Performance of POM through the Incorporation of Bio-Based Materials // *Polymers*. – 2024. – Vol. 16, no. 16. – P. 2310. – DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16162310>.

84. Bergmann A., et al. Semi-analytical calculation model for friction of polymers on the example of POM | PE-UHMW and steel | PE-UHMW // *Friction*. – 2024. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-024-0887-2>.

85. Shanmugam V., et al. The thermal properties of FDM printed polymeric materials: A review // *Polymer Degradation and Stability*. – 2024. – P. 110902. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2024.110902>.

86. Morancho J. M., et al. Comparative study of the degradation kinetics of three powder thermoset coatings // *Thermochimica Acta*. – 2004. – Vol. 419, no. 1–2. – P. 181–187. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2004.02.011>.

87. Silva M. P., et al. Stability of the electroactive response of  $\beta$ -poly(vinylidene fluoride) for applications in the petrochemical industry // *Polymer Testing*. – 2010. – Vol. 29, no. 5. – P. 613–615. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2010.03.012>.

88. Krella A. Influence of cavitation intensity on X6CrNiTi18-10 stainless steel performance in the incubation period // *Wear*. – 2005. – Vol. 258, no. 11–12. – P. 1723–1731. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.11.025>.

89. Li S., et al. Mechanical Properties of Cement Matrix Composites Reinforced with Polyoxymethylene Fibers of Different Lengths // *Journal of Materials in Civil Engineering*. – 2024. – Vol. 36, no. 3. – DOI: <https://doi.org/10.1061/jmcee7.mteng-16883>.

90. Fischer M., et al. Correlations between molecular weight, mechanical properties and morphology of micro-injection molded polyoxymethylene (POM) // *Polymer Testing*. – 2024. – P. 108626. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108626>.

91. Zhao X., Ye L. Structure and mechanical properties of polyoxymethylene/multi-walled carbon nanotube composites // *Composites Part B: Engineering*. – 2011. – Vol. 42, no. 4. – P. 926–933. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.002>.

92. Vasudevan P., Sarma N. L. N. Composite cation exchangers // *Journal of Applied Polymer Science*. – 1979. – Vol. 23, no. 5. – P. 1443–1448. – DOI: <https://doi.org/10.1002/app.1979.070230514>.

93. Gilbert M. Aliphatic Polyamides // *Brydson's Plastics Materials*. – 2017. – P. 487–511. – DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-35824-8.00018-9>.

94. Sharma S. C., et al. Sliding wear behaviour of zircon particles reinforced ZA-27 alloy composite materials // *Wear*. – 1999. – Vol. 224, no. 1. – P. 89–94. – DOI: [https://doi.org/10.1016/s0043-1648\(98\)00334-2](https://doi.org/10.1016/s0043-1648(98)00334-2).

95. Huang C.-Y., Tseng C.-I. The effect of interface modification between POM and PTFE on the properties of POM/PTFE composites // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2000. – Vol. 78, no. 4. – P. 800–807. – DOI: [https://doi.org/10.1002/1097-4628\(20001024\)78:4%3C800::aid-app130%3E3.0.co;2-y](https://doi.org/10.1002/1097-4628(20001024)78:4%3C800::aid-app130%3E3.0.co;2-y).

96. Whitney J. M., Riley M. B. Elastic properties of fiber reinforced composite materials // *AIAA Journal*. – 1966. – Vol. 4, no. 9. – P. 1537–1542. – DOI: <https://doi.org/10.2514/3.3732>.

97. Miyase A., et al. Elevated-Temperature Thermal Expansion of PTFE/PEEK Matrix Composite With Random-Oriented Short Carbon Fibers and Graphite Flakes // *Journal of Engineering Materials and Technology*. – 2019. – Vol. 142, no. 2. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4045158>.

98. Dong W., et al. Carbon Fiber-Reinforced Polyamide 6 Composites: Impact of Fiber Type and Concentration on the Mechanical Properties // *Materials*. – 2025. – Vol. 18, no. 7. – P. 1413. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18071413>.

99. Zhang F.-H., et al. Interfacial shearing strength and reinforcing mechanisms of an epoxy composite reinforced using a carbon nanotube/carbon fiber hybrid // *Journal of Materials Science*. – 2009. – Vol. 44, no. 13. – P. 3574–3577. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3484-x>.

100. Xue Y., et al. Interfacial microstructure and strengthening mechanisms of Cf/Mg composite with double-layer interface // *Ceramics International*. – 2021. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.07.289>.

101. Zheng Y., Wang X., Wu G. Facile Strategy of Improving Interfacial Strength of Silicone Resin Composites Through Self-Polymerized Polydopamine Followed via the Sol-Gel Growing of Silica Nanoparticles onto Carbon Fiber // *Polymers*. – 2019. – Vol. 11, no. 10. – P. 1639. – DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11101639>.

102. Wang T., et al. Synergistic effects of carbon fiber and polytetrafluoroethylene on the friction and wear behavior of polyarylene ether nitrile under dry lubrication condition // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1002/app.54299>.

103. Li Y., et al. Tribological Behavior of PEEK/PTFE Composites Reinforced with Carbon Fibers and Graphite // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, no. 20. – P. 7078. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15207078>.

104. Messier D. R., Patel P. J. High modulus glass fibers // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 1995. – Vol. 182, no. 3. – P. 271–277. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(94\)00520-6](https://doi.org/10.1016/0022-3093(94)00520-6).

105. Chernets M., et al. Triboanalysis of Antifrictional Materials Based on Polyamides for Metal-Polymer Sliding Bearings // *Journal of Friction and Wear*. – 2023. – Vol. 44, no. 2. – P. 63–70. – DOI: <https://doi.org/10.3103/s1068366623020034>.

106. Garg M., Sharma S., Mehta R. Role of curing conditions and silanization of glass fibers on carbon nanotubes (CNTs) reinforced glass fiber epoxy composites // *Composite*

*Interfaces.* – 2016. – Vol. 24, no. 2. – P. 233–253. – DOI: <https://doi.org/10.1080/09276440.2016.1201373>.

107. Garg M., Sharma S., Mehta R. Role of curing conditions and silanization of glass fibers on carbon nanotubes (CNTs) reinforced glass fiber epoxy composites // *Composite Interfaces.* – 2016. – Vol. 24, no. 2. – P. 233–253. – DOI: <https://doi/abs/10.1126/science.1222453>.

108. Kováčik J., et al. Effect of composition on friction coefficient of Cu–graphite composites // *Wear.* – 2008. – Vol. 265, no. 3–4. – P. 417–421. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.11.012>.

109. Ning H., et al. Modeling and prediction of tribological properties of graphite-filled PTFE self-lubricating composites based on machine learning algorithms // *Journal of Materials Science.* – 2025. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-025-11049-4>.

110. Zhang L., et al. Improving the morphology of terrace-like transfer film to reduce wear rate of graphite/PTFE composites via filling low content silica // *Industrial Lubrication and Tribology.* – 2024. – DOI: <https://doi.org/10.1108/ilt-08-2024-0310>.

111. Li Y., et al. Tribological Behavior of PEEK/PTFE Composites Reinforced with Carbon Fibers and Graphite // *Materials.* – 2022. – Vol. 15, no. 20. – P. 7078. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15207078>.

112. Lince J. R. Tribology of Co-sputtered Nanocomposite Au/MoS<sub>2</sub> Solid Lubricant Films over a Wide Contact Stress Range // *Tribology Letters.* – 2004. – Vol. 17, no. 3. – P. 419–428. – DOI: <https://doi.org/10.1023/b:tril.0000044490.03462.6e>.

113. Chernets M., et al. Triboanalysis of Antifrictional Materials Based on Polyamides for Metal-Polymer Sliding Bearings // *Journal of Friction and Wear.* – 2023. – Vol. 44, no. 2. – P. 63–70. – DOI: <https://doi.org/10.3103/s1068366623020034>.

114. Zhen J., et al. High Temperature Friction and Wear Behavior of PTFE/MoS<sub>2</sub> Composites // *Lubricants.* – 2023. – Vol. 11, no. 8. – P. 312. – DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants11080312>.

115. Fleischauer P. D. Fundamental aspects of the electronic structure, materials properties and lubrication performance of sputtered MoS<sub>2</sub> films // *Thin Solid Films*. – 1987. – Vol. 154, no. 1–2. – P. 309–322. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(87\)90375-0](https://doi.org/10.1016/0040-6090(87)90375-0).
116. Brewis D. M., et al. Adhesion Studies of Fluoropolymers // *The Journal of Adhesion*. – 1993. – Vol. 41, no. 1–4. – P. 113–128. – DOI: <https://doi.org/10.1080/00218469308026557>.
117. Morra M., Occhiello E., Garbassi F. Surface characterization of plasma-treated PTFE // *Surface and Interface Analysis*. – 1990. – Vol. 16, no. 1–12. – P. 412–417. – DOI: <https://doi.org/10.1002/sia.740160186>.
118. Wu H., et al. Synergistic Enhancement of PTFE Tribological Performance via LDH-Induced Adsorption and PEEK Support Framework // *ACS Applied Polymer Materials*. – 2025. – DOI: <https://doi.org/10.1021/acsapm.5c01711>.
119. Jozwik J., et al. Analysis and Comparative Assessment of Basic Tribological Properties of Selected Polymer Composites // *Materials*. – 2019. – Vol. 13, no. 1. – P. 75. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13010075>.
120. Park J. S., et al. The effect of material properties on the stick–slip behavior of polymers: A case study with PMMA, PC, PTFE, and PVC // *Wear*. – 2017. – Vol. 378–379. – P. 11–16. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.097>.
121. Wang Y., Yan F. Tribological properties of transfer films of PTFE-based composites // *Wear*. – 2006. – Vol. 261, no. 11–12. – P. 1359–1366. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.050>.
122. Wei J., et al. How moisture driven mechanochemistry stabilizes transfer film adhesion and cohesion in ultralow wear PTFE composite // *Wear*. – 2023. – Vol. 516–517. – P. 204617. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204617>.
123. Zhang H., et al. Strength and toughness: Multi-particle synergism imparts rigid-toughness balance to poly(ether-ether-ketone) composites // *Polymer Composites*. – 2025. – DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.29939>.

124. Li X., et al. Surface-modification in situ of nano-SiO<sub>2</sub> and its structure and tribological properties // *Applied Surface Science*. – 2006. – Vol. 252, no. 22. – P. 7856–7861. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.09.068>.

125. Chen L., et al. Tribology of Si/SiO<sub>2</sub> in Humid Air: Transition from Severe Chemical Wear to Wearless Behavior at Nanoscale // *Langmuir*. – 2014. – Vol. 31, no. 1. – P. 149–156. – DOI: <https://doi.org/10.1021/la504333j>.

126. Oosterbaan W. D., et al. On the Relation between Morphology and FET Mobility of Poly(3-alkylthiophene)s at the Polymer/SiO<sub>2</sub> and Polymer/Air Interface // *Advanced Functional Materials*. – 2013. – Vol. 24, no. 14. – P. 1994–2004. – DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201303298>.

127. Lv W., et al. Tribological and Mechanochemical Properties of Nanoparticle-Filled Polytetrafluoroethylene Composites under Different Loads // *Polymers*. – 2024. – Vol. 16, no. 7. – P. 894. – DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16070894>.

128. Zhou S., et al. The effect of silica and copper nanoparticles in polyimide on the friction and wear of polyethersulfone/polyimide mixture // *Polymers and Polymer Composites*. – 2022. – Vol. 30. – P. 096739112211334. – DOI: <https://doi.org/10.1177/09673911221133438>.

129. Lv W., et al. Tribological and Mechanochemical Properties of Nanoparticle-Filled Polytetrafluoroethylene Composites under Different Loads // *Polymers*. – 2024. – Vol. 16, no. 7. – P. 894. – DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16070894>.

130. Schmidt J., et al. Surface passivation of high-efficiency silicon solar cells by atomic-layer-deposited Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. – 2008. – Vol. 16, no. 6. – P. 461–466. – DOI: <https://doi.org/10.1002/ppp.823>.

131. Greenfield I., et al. Intermittent beading in fiber composites // *Composites Science and Technology*. – 2018. – Vol. 160. – P. 21–31. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.03.003>.

132. Jia Y., Chen Z., Yan W. A numerical study on carbon nanotube pullout to understand its bridging effect in carbon nanotube reinforced composites // *Composites Part B*:

*Engineering.* – 2015. – Vol. 81. – P. 64–71. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.07.003>.

133. Yang P., et al. Investigation of the microstructure and tribological properties of CNTs/Ni composites prepared by electrodeposition // *Materials Research Express.* – 2022. – Vol. 9, no. 3. – P. 036404. – DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac5c2b>.

134. Panin S. V., Alexenko V. O., Buslovich D. G. High Performance Polymer Composites: A Role of Transfer Films in Ensuring Tribological Properties – A Review // *Polymers.* – 2022. – Vol. 14, no. 5. – P. 975. – DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14050975>.

135. Ujah C. O., Kallon D. V. V., Aigbodion V. S. Tribological Properties of CNTs-Reinforced Nano Composite Materials // *Lubricants.* – 2023. – Vol. 11, no. 3. – P. 95. – DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants11030095>.

136. Miao Y., et al. Tribological properties of carbon nanotube/polymer composites: A mini-review // *Frontiers in Materials.* – 2023. – Vol. 10. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1129676>.

137. Li Y., et al. Tribological Behavior of PEEK/PTFE Composites Reinforced with Carbon Fibers and Graphite // *Materials.* – 2022. – Vol. 15, no. 20. – P. 7078. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15207078>.

138. Hou X., et al. MoS<sub>2</sub> reinforced PEEK composite for improved aqueous boundary lubrication // *Friction.* – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-022-0673-y>.

139. Industrial R. Офіційний сайт. – URL: <https://www.roechling.com/> (дата звернення: 07.04.2025).

140. Industrial R. Sustamid 66 natural: Technical Data Sheet. – URL: <https://www.roechling.com/fileadmin/assets/Technical%20Data%20Sheet%20Sustamid%2066%20natural%20591028%20EN.pdf> (дата звернення: 07.04.2025).

141. Industrial R. Sustamid 6G OL natural: Technical Data Sheet. – URL: <https://www.roechling.com/fileadmin/assets/Technical%20Data%20Sheet%20Sustamid%206G%20OL%20natural%20591280%20EN.pdf> (дата звернення: 10.04.2025).

142. Industrial R. Sustamid 6G OL yellow: Engineering Plastics. – URL: <https://www.roechling.com/industrial/materials/thermoplastics/engineering-plastics/pa/pa-6-g/sustamid-6g-ol-yellow-591039> (дата звернення: 11.04.2025).
143. GmbH W.-K.-G. Zedex® ZX-100K: Material Data Sheet. – 2025.
144. Industrial R. SustaPEEK natural: Technical Data Sheet. – URL: [https://www.roechling.com/fileadmin/assets/591414\\_technical-data-sheet\\_fr.pdf](https://www.roechling.com/fileadmin/assets/591414_technical-data-sheet_fr.pdf) (дата звернення: 11.04.2025).
145. GmbH W.-K.-G. Zedex® ZX-324: High performance plastic based on PEEK. – URL: <https://www.zedex.de/en/brands/zx-324> (дата звернення: 21.04.2025).
146. Liu Z., et al. Study on the Friction and Wear Properties of PA66 Composites Reinforced with Glass Fiber and Carbon Fiber // *Materials*. – 2025. – Vol. 18, no. 14. – P. 3370. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18143370>.
147. Kumar N., Satapathy R. Bearings in Aerospace, Application, Distress, and Life: A Review // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11668-023-01658-z>.
148. Zhang C., et al. Molecular Dynamics Study on Thermal Conductivity Properties and Dielectric Behaviors of Graphene-Based Epoxy Resin Nanocomposites // *Polymers*. – 2025. – Vol. 17, no. 1. – P. 112. – DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17010112>.
149. Олександренко В. П., Диха О. В., Повар Ю. В. Математичне моделювання температурного поля в зоні фрикційного контакту при гальмуванні // *Обробка інформації в складних технічних системах*. – 2022. – Т. 96, № 1–2. – С. 13–21. – DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2022.96.02>.
150. *Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – Determination of friction and wear characteristics of monolithic ceramics by ball-on-on-disk method*. – Official edition. – Geneva: International Organization for Standardization, 2016. – 26 p. – URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/65415/4741c166d4604bb1bc1d87a3e7006ed0/ISO-20808-2016.pdf> (дата звернення: 05.05.2025).

151. *Plain bearings – Testing of the tribological behaviour of bearing materials – Part 2: Testing of polymer-based bearing materials.* – Official edition. – Geneva: International Organization for Standardization, 2024. – 18 p. – URL: <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:7148:-2:ed-3:v1:en> (дата звернення: 10.05.2025).

152. Nagoriya H., Arora G. Pin-On-Disk Computational Analysis: A Powerful Tool for Characterizing the Mechanical Properties of Polymers and Polymer Composites // *Lecture Notes in Mechanical Engineering.* – Singapore, 2024. – P. 199–214. – DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-97-0918-2\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-97-0918-2_16).

153. *Plain bearings – Testing of the tribological behaviour of bearing materials – Part 2: Testing of polymer-based bearing materials.* – Official edition. – Geneva: International Organization for Standardization, 1999. – 12 p. – URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/20994/7562c74f2fd64712887a7b6d09190328/ISO-7148-2-1999.pdf> (дата звернення: 03.06.2025).

154. *Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test.* – Official edition. – West Conshohocken: ASTM International, 2022. – 15 p. – URL: [https://img.antpedia.com/standard/files/pdfs\\_ora/20230612/astm/G/G%2077%20-%2017%20\(2022\).pdf](https://img.antpedia.com/standard/files/pdfs_ora/20230612/astm/G/G%2077%20-%2017%20(2022).pdf) (дата звернення: 03.06.2025).

155. Awwad K. Y. E., et al. Finite element analysis and experimental validation of polymer–metal contacts in block-on-ring configuration // *Friction.* – 2023. – Vol. 12, no. 3. – P. 554–568. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-023-0795-x>.

156. Bochkareva S. A., et al. Effect of the Thermal Conductivity of Mated Materials on the Wear Intensity of a Polymer–polymer Friction Pair // *Mechanics of Composite Materials.* – 2022. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11029-022-10032-3>.

157. GmbH A. P. TRB<sup>3</sup>: Pin-on-Disk Tribometer: Product details. – Graz, 2025.

158. Corp. N. I. Measuring Strain with Strain Gages: Sensor Fundamentals. – URL: <https://www.ni.com/en/shop/data-acquisition/sensor-fundamentals/measuring-strain-with-strain-gages.html> (дата звернення: : 03.06.2025).

159. Al-Dahiree O. S., et al. Design and Shape Optimization of Strain Gauge Load Cell for Axial Force Measurement for Test Benches // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, no. 19. – P. 7508. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s22197508>.

160. Cristino V. A. M., Rosa P. A. R., Martins P. A. F. The utilisation of pin-on-disc simulative tests for the calibration of friction in mechanical processing of materials // *International Journal of Surface Science and Engineering*. – 2010. – Vol. 4, no. 1. – P. 13. – DOI: <https://doi.org/10.1504/ijsurfse.2010.029626>.

161. Crescentini M., Syeda S. F., Gibiino G. P. Hall-Effect Current Sensors: Principles of Operation and Implementation Techniques // *IEEE Sensors Journal*. – 2021. – P. 1. – DOI: <https://doi.org/10.1109/jsen.2021.3119766>.

162. Zuo Z., et al. Study on the Friction and Wear Properties of PA66 Composites Reinforced with Glass Fiber and Carbon Fiber // *Lubricants*. – 2025. – Vol. 13, no. 3. – P. 100. – DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants13030100>.

163. Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). *Guide to the Realization of the ITS-90: Platinum Resistance Thermometry*. – BIPM, 2021. – 53 p. – URL: <https://www.bipm.org/documents/20126/41773843/Guide ITS90 5 SPRT 2021.pdf> (дата звернення: 13.06.2025).

164. Диха О. В., та ін. Моделювання зношування антифрикційних матеріалів при терті та ковзанні // *Вісник Національного авіаційного університету*. – 2023. – Т. 95, № 2. – С. 60–68. – DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(95\).17624](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(95).17624).

165. Antunes J. M., et al. Ultra-microhardness testing procedure with Vickers indenter // *Surface and Coatings Technology*. – 2002. – Vol. 149, no. 1. – P. 27–35. – DOI: [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(01\)01413-x](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(01)01413-x).

166. Flores A. Indentation creep in polymers and polymer nanocomposites // *Pure and Applied Chemistry*. – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1515/pac-2023-1004>.

167. Chaddock R. E. The Graphic Representation of a Frequency Distribution // *Quarterly Publications of the American Statistical Association*. – 1921. – Vol. 17, no. 134. – P. 769–775. – DOI: <https://doi.org/10.1080/15225445.1921.10503836>.

168. Milosevic M., Valášek P., Ruggiero A. Tribology of Natural Fibers Composite Materials: An Overview // *Lubricants*. – 2020. – Vol. 8, no. 4. – P. 42. – DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants8040042>.

169. Celik C., Warner S. B. Analysis of the structure and properties of expanded graphite-filled poly(phenylene ether)/atactic polystyrene nanocomposite fibers // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2006. – Vol. 103, no. 2. – P. 645–652. – DOI: <https://doi.org/10.1002/app.23772>.

## ДОДАТКИ

А. Список публікацій за темою дисертації.

Б. Акти впровадження та реалізації результатів наукових досліджень.

**Список публікацій за темою дисертації.****У фахових виданнях категорії Б:**

1. **Марчук Р.**, Мнацаканов Р. Аналіз полімерних композиційних матеріалів для підшипників ковзання. *Problems of Friction and Wear*. 2023. № 1(98). С. 55–62. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(98\).17359](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(98).17359)
2. **Марчук Р.**, Мнацаканов Р. Трибометрична машина для дослідження трибологічних характеристик полімерів. *Problems of Friction and Wear*. 2023. № 2(99). С. 32–38. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(99\).17624](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(99).17624)
3. **Марчук Р.**, Мнацаканов Р. Аналіз та інтерпретація зносу полімерних матеріалів на основі трибометричних досліджень. *Problems of Friction and Wear*. 2023. № 4(101). С. 52–59. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(101\).18079](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(101).18079)
4. **Марчук Р.**, Мнацаканов Р. Аналіз основних функціональних параметрів шорсткості мікрорельєфу поверхні полімерів. *Problems of Friction and Wear*. 2024. № 2(103). С. 130–139. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(103\).18695](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(103).18695)
5. **Marchuk R.**, Mnatsakanov R., Yashchuk O. P., Kushch O. I., Nyshchuk D. Influence of tribotesting on microhardness of polymers. *Problems of Tribology*. 2025. Т. 30, № 1/115. С. 45–50. URL: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2025-115-1-45-50>
6. **Марчук Р.**, Мнацаканов Р. Трибологічні випробування та структурна адаптація полімерних композитів. *Problems of Friction and Wear*. 2026. № 4(109). С. 131–138. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(109\).20761](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(109).20761)

**Опубліковані праці апробаційного характеру:**

7. Малярчук І. В., Мікосянчик О. О., Педан Є. В., **Марчук Р. М.** Вплив модифікаторів тертя на триботехнічні характеристики контакту. *ABIA-2023: матеріали XVI міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 18–20 квітня 2023 р., Київ, 2023*. С. 1.54–1.57. URL: <https://conference.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2022/paper/viewFile/8867/7018>.

8. Бахтіаров Я., **Марчук Р.** Підвищення експлуатаційних властивостей полімерних матеріалів для підшипників ковзання. *Політ. Сучасні проблеми науки: матеріали XXIII міжнар. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених*, м. Київ, 4–7 квітня 2023 р., Київ, 2023. С. 33–37.

9. Мнацаканов Р. Г., Погребняк Н. О., **Марчук Р.** Вплив швидкості ковзання на шорсткість та зносостійкість полімерних матеріалів. *Авіація в XXI столітті – Безпека в авіації та космічні технології: матеріали XI Всесвітнього конгресу*, м. Київ, 25–28 вересня 2024 р., Київ, 2024. С. 1.2.5–1.2.8.

URL: <https://congress.nau.edu.ua/2024/info/Congress-2024.pdf>.

10. Турчаненко М., **Марчук Р.** Дослідження властивостей полімерних матеріалів та їх можливе застосування: переваги і недоліки. *Політ. Сучасні проблеми науки: матеріали XXIV міжнар. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених*, м. Київ, 2–5 квітня 2024 р., Київ, 2024. С. 41–42.

URL: <https://aki.kai.edu.ua/wpcontent/uploads/%d0%9f%d0%be%d0%bb%d1%96%d1%8224 %d0%90%d0%9a%d0%a4.pdf>

11. Нищук Д. В., **Марчук Р. М.** Оцінка мікротвердості полімерів при терті ковзання. *Політ. Сучасні проблеми науки: матеріали XXV міжнар. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених*, м. Київ, 1–4 квітня 2025 р., Київ, 2025. – С. 52–53.

URL: [https://nau.edu.ua/site/variables/docs/docsmenu/studnauka/polit2025/Polit-2025\\_AKF.pdf](https://nau.edu.ua/site/variables/docs/docsmenu/studnauka/polit2025/Polit-2025_AKF.pdf)

## Акти впровадження та реалізації результатів наукових досліджень.

ЗАТВЕРДЖУЮ  
 Директор департаменту якості  
 ТОВ «НД Продажин»  
 Кисельова Т.В.  
 " 09 " 10 2025.

### АКТ про реалізацію результатів наукових досліджень МАРЧУКА Романа Миколайовича

Комісія у складі:  
 голови комісії – Директор виробництва ТОВ «НД Продажин» Малишев Ю.О.  
 та членів комісії – Головний технолог ТОВ «НД Продажин» Тимофєєв Д.Г.  
 Начальника ВТК ТОВ «НД Продажин» Леусенко Д.В.

встановила, що результати експериментальних досліджень, отримані особисто МАРЧУКОМ Р.М., були реалізовані у наступній методиці:

**Методика виготовлення та термічної стабілізації високопродуктивних епоксиграфітових композитів для вузлів тертя.**

Методика дозволяє формувати жорстку тривимірну зшиту структуру реактопластичних систем на основі авіаційної епоксидної смоли Ерікоте LR285, що забезпечує стабільність механічних властивостей у широкому діапазоні температур. Запропонований підхід забезпечує високу гомогенність розподілу дисперсного графіту (до 20,5% за масою) та ефективне відведення надлишкового тепла від фактичних плям контакту, запобігаючи термічній деструкції полімеру.

**Технологічні умови та параметри виготовлення за запропонованою методикою включають:**

- Використання смоли з низькою початковою в'язкістю (600–900 мПа·с) та механічне перемішування для запобігання седиментації графітового наповнювача;
- Попереднє нагрівання металевих форм до температури 35 °С для забезпечення повної заповнюваності об'єму та мінімізації внутрішніх напружень;
- Витримка протягом 24 годин при температурі 50–55 °С для формування стабільної молекулярної сітки;
- Термічну стабілізацію при температурі 80 °С, що гарантує працездатність матеріалу в умовах теплового фону до +72 °С;
- Забезпечення стабільної структурної адаптації композиту при високих швидкостях ковзання (від 1,4 до 5,5 м/с).

Запропонована методика виготовлення та стабілізації антифрикційних матеріалів дозволяє створювати високонаповнені системи з прогнозованою мікроструктурою. Використання дисперсного графіту як поліфункціонального наповнювача забезпечує самозмашувальні властивості та підвищену теплопровідність, що дозволяє уникнути виникнення «гарячих точок» у зоні контакту.

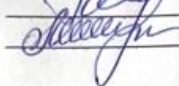
Отримані результати дають змогу обґрунтовано замінювати промислові термопласти (РАб, РОМ, РЕЕК) на експериментальні епоксидні композити у високоавантажених вузлах, де критичними є стійкість до повзучості та теплового розм'якшення.

Впровадження методики дає можливість розробляти практичні рекомендації щодо проектування підшипників ковзання, які здатні працювати в екстремальних температурно-швидкісних режимах

Даний акт не є основою для фінансових претензій до підприємства.

Голова комісії:  Малишев Ю.О.

Члени комісії:  Тимофєєв Д.Г.

 Леусенко Д.В.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукових досліджень та  
трансферу технологій

Сергій ГНАТЮК

10 2026 року

## АКТ

Комісія у складі:

голови

– завідувача кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, д.т.н.,  
професора Мікосянчик Оксани Олександрівни;

членів комісії:

– доцента кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, к.т.н.,  
доцента Башти Олександра Васильовича;– доцента кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, к.т.н.,  
доцента Шевченка Олега Анатолійовича

цим Актом засвідчує, що результати дисертаційного дослідження аспіранта кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Державного університету «Київський авіаційний інститут» (КАІ) Марчука Романа Миколайовича на тему «Підвищення триботехнічних характеристик пар ковзання поліпшенням протизношувальних властивостей полімерних та композиційних матеріалів» на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 Прикладна механіка впроваджені в навчальний процес КАІ.

Зокрема, у процесі підготовки курсів лекцій та практичних занять з дисципліни «Технології конструкційних матеріалів» для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «Бакалавр» розглянуто сучасні полімерні та полімерні композиційні матеріали для підшипників ковзання та технології їх виготовлення; підготовки тем кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «Магістр» зі спеціальності 272 Авіаційний транспорт.

Також аспірант Марчук Роман Миколайович був виконавцем науково-дослідної роботи № 48-2022/07.06 (кафедральної) «Підвищення ресурсу відповідальних вузлів авіаційної техніки та удосконалення технічного обслуговування повітряних суден». Особистий внесок: розробка технологічних заходів підвищення зносостійкості деталей авіаційних трибомеханічних систем.

Голова комісії

доктор технічних наук, професор

Оксана МІКОСЯНЧИК

Члени комісії

кандидат технічних наук, доцент

Олександр БАШТА

кандидат технічних наук, доцент

Олег ШЕВЧЕНКО



ЗАТВЕРДЖУЮ  
Головний інженер

Сергій СВИСТЮЛА

02 2026р.

**АКТ**  
**про реалізацію результатів наукових досліджень**  
**МАРЧУКА Романа Миколайовича**

Комісія у складі:

голови комісії – головного технолога КОТИКА Михайла

та членів комісії – заступника директора підприємства з якості ТРЕГУБА Олександра, керівника проектів та програм у сфері матеріального виробництва (розвитку технологій) ГУСЄВА Юрія,

встановила, що результати експериментальних досліджень, отримані особисто МАРЧУКОМ Романом, були реалізовані у наступній методиці:

**Методика оцінки протизношувальних властивостей полімерних та полімерних композиційних матеріалів.** Методика дозволяє визначити стійкість зразків до деформації, кінетику зміни мікротвердості у зоні тертя, здатність матеріалу до структурної адаптації під дією механічних навантажень, а також вплив термічної та механічної деградації на поверхневі шари полімерів.

**Експериментальні умови проведення досліджень за запропонованою методикою включають:**

- випробування проводяться при температурі навколишнього середовища 18–25 °С, відносній вологості повітря 30–80 %;

- контртіло виготовлено зі сталі 30ХГСА з твердістю HRC 43 та шорсткістю поверхні Ra 0,37 мкм;

- у каркасній рамі трибологічної установки одночасно закріплюються два циліндричні зразки досліджуваних матеріалів (Ø8мм, довжина 20-30мм);

- для контролю температурного поля у зоні тертя застосовується система терморезистивних датчиків типу Pt100 для забезпечення моніторингу розподілу температури у зоні контакту;

- трибологічні дослідження проводяться при 200, 400 та 800 об/хв, що відповідає швидкостям ковзання 1,4; 2,8 та 5,5 м/с.

Запропонована методика оцінки триботехнічних властивостей полімерних та полімерних композиційних матеріалів дозволяє визначити коефіцієнт тертя, ваговий знос досліджуваних матеріалів, виявляти нетипові ефекти, зокрема мікрозміцнення та структурну реорганізацію макромолекул у зоні тертя. Отримані результати характеризують антифрикційні, змашувальні та протизношувальні властивості матеріалів і дають змогу обґрунтовано обирати оптимальні комбінації для виробництва підшипників, що працюють у різних режимах мащення.

Запропонована методика відповідає частині другій стандарту ISO 7148-2:2026 «Plain bearings — Testing of the tribological behaviour of bearing materials», де зазначені методи трибологічних випробувань, що дозволяють оцінити поведінку полімерних композитів та композиційних матеріалів з металевою матрицею в умовах тертя.

Оцінка трибологічних властивостей змашених та незмашених матеріалів підшипників ковзання на полімерній основі при певних навантаженнях, швидкості ковзання та температурі за запропонованою методикою та забезпечення відповідності методики стандарту випробувань ISO 7148-2026 дає можливість розробляти практичні рекомендації щодо навантажувально-швидкісних та температурних умов експлуатації полімерних матеріалів та полімерних композиційних матеріалів для підшипників ковзання.

Даний акт не є основою для фінансових претензій до підприємства.

Голова комісії:  Михайло КОТИК

Члени комісії:  Олександр ТРЕГУБ

Юрій ГУСЄВ