

ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО - ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО - НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
«УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПІКУЛА ІВАН ІВАНОВИЧ

УДК 678.033

ДИСЕРТАЦІЯ
КОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ ФТОРПОЛІМЕРІВ ТА ДІОКСИДУ КРЕМНІЮ
ДЛЯ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

16 – Хімічна інженерія та біоінженерія

161 – Хімічні технології та інженерія

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

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



І. І. Пікула

Науковий керівник:

Кабат Олег Станіславович,
доктор технічних наук, професор

Дніпро – 2025

АНОТАЦІЯ

Пікула І.І. «Композити на основі фторполімерів ті діоксиду кремнію для вузлів тертя технологічного обладнання». - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія. – Науково Навчальний Інститут «Український Державний Хіміко Технологічний Університет» Українського Державного Університету Науки і Технологій, Дніпро, 2025.

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі інноваційної інженерії Науково Навчального Інституту «Український Державний Хіміко Технологічний Університет» Українського Державного Університету Науки і Технологій.

Дисертацію присвячено вирішенню проблеми створення полімерних композитів, отриманих за сучасним методом переробки у вироби, який дозволяє якісно розподілити наповнювач у об'ємі полімерної матриці і отримувати матеріали із достатньо високим рівнем фізико-механічних та теплофізичних властивостей для використання у вузлах тертя технологічного обладнання.

Актуальність роботи обумовлена нестачею матеріалів триботехнічного призначення, які працюючи у вузлах тертя технологічного обладнання здатні значно зменшити витрати енергії на подолання тертя із теперішніх 23% до мінімуму, що сприятиме значному зменшенню витрат енергетичних ресурсів (викопне паливо, електрична енергія тощо) необхідних для його роботи.

Об'єкт дослідження - експериментальні закономірності створення полімерних композитів на основі фторполімерів і силікагелю для вузлів тертя технологічного обладнання.

Предмет дослідження - фторполімери на основі політетрафторетилену, кополімеру тетрафторетилену з етиленом, полівініліденфториду і силікагелю та методи виготовлення виробів із них.

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету, задачі, об'єкт і предмет досліджень, висвітлено наукову новизну та практичне

значення отриманих результатів, наведено зв'язок роботи із іншими науковими тематиками та приведено особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** приведено літературний огляд джерел інформації щодо матеріалів триботехнічного призначення для вузлів тертя технологічного обладнання. Розглянуті найбільш розповсюджені основи (метали та їх сплави, неметали) для створення таких матеріалів та обґрунтовано доцільність використання фторполімерів і композитів на їх основі в якості найбільш перспективних матеріалів для вузлів тертя технологічного обладнання. Розглянуто основні види наповнювачів та модифікаторів, які використовуються для покращення рівня властивостей вихідних полімерів. Доведено, що матеріали на основі діоксиду кремнію є одними із найкращих наповнювачей полімерів, які, завдяки своїй розвиненій поверхні та активним силанольним групам на ній, здатні покращувати не тільки трибологічні властивості отриманих композитів при їх фрикційній взаємодії із сталлю, а і сприяти збільшенню їх фізико-механічних та теплофізичних властивостей. Проведено огляд основних способів переробки полімерів у вироби. Зокрема визначили, що вибрані фторполімери переробляються у вироби, як високопродуктивними методами (лиття під тиском, екструзія тощо), так і низькопродуктивними (спікання, пресування у формах із підігрівом) методами переробки у вироби. Зважаючи на це та специфіку роботи, яка пов'язана із матеріалами для вузлів тертя, які не є, у більшості випадків, продукцією масового виробництва, нами було обрано для застосування у роботі наступні методи переробки фторполімерів: спікання та пресування у формах із підігрівом.

У **другому розділі** було розглянуто інформацію щодо об'єктів та методів дослідження, які використовуються у роботі. В якості полімерних основ було обрано наступні фторполімери: політетрафторетилен, кополімер тетрафторетилену з етиленом та полівінілденфторид. В якості наповнювача було обрано діоксид кремнію силікагель. Приведено структурні формули цих матеріалів, їх основні властивості, марки та виробники. Також наведено усі методики досліджень, із посиланнями на стандарти, що використовувалися у даній роботі та приведено обладнання на якому вони проводилися.

У **третьому розділі** преведено результати експериментів щодо визначення найкращої методики переробки фторполімерів у виробі та оптимальних параметрів переробки. Описано операції, що виконуються на підготовчому, основному та заключному етапах переробки фторполімерів. Описані операції із підготовки вихідних компонентів полімерних композицій, а саме просіювання, синтез наповнювача їх суміщення та брикетування. Запропонована нова методика *in situ* суміщення вихідних компонентів полімерної композиції у процесі синтезу наповнювача силікагелю, яка дозволяє отримувати композити із 50-60% покращенням якості розподілення наповнювача у порівнянні із аналогами, отриманими за стандартним механічним методом суміщення. Що буде оказувати позитивний вплив на властивості розроблених композитів. Визначено, що оптимальний, з точки зору міцності брикету та енерговитрат на його отримання, тиск та час витримки під тиском при брикетування досліджуваних матеріалів на основі фторполімерів лежить в інтервалі 25-30 МПа та 60-90 секунд відповідно. Відповідно до рівня фізико-механічних властивостей розроблених композитів визначені їх оптимальні значення основних параметрів переробки на основному етапі переробки. Так переробку у виробі методом пресуванні у формах із підігрівом необхідно проводити для композитів на основі кополімеру тетрафторетилена з етиленом при темпеартурі 270°C та тиску 40 МПа, а для матеріалу на основі полівінілденфториду при 180°C та 40 МПа.

У **четвертому розділі** розглянуто вплив складів та методів переробки на властивості розроблених полімерних композитів на основі фторполімерів. Доведено, що введення силікагелю у склад фторполімерів дозволяє збільшити їх термо- та теплостійкість на 30-40 та 6-16°C в залежності від складу композитів та методу їх отримання. Що пов'язано із взаємодією полімерних молекул із наповнювачем силікагелем у результаті якого відбувається обмеження їх рухомості при термічній дії на композит. Визначено, що полімерні композити, отримані за допомогою *in situ* суміщення вихідних компонентів полімерних композицій мають на 10-15 та 1-6°C кращі показники значень температур початку активної деструкції та розм'якшення за Віка ніж ті, що отримані за стандартним (механічним) методом суміщення. Що

підтверджує припущення щодо впливу кращої якості розподілення силікагелю в об'ємі полімеру у композитів, отриманих за *in situ* суміщенням вихідних компонентів. Визначено, що введення силікагелю до фторполімерів дозволяє покращити їх фізико-механічні властивості. Так напруження при межі текучості та модуль пружності при стисканні та твердість збільшуються на 25-55% для композиту на основі політетрафторетилену, 25-30% - кополімеру поліетилену із тетрафторетилену та на 30-35% полівініліденфториду у порівнянні із вихідними полімерами. Що є свідченням фізико-хімічної дії наповнювача на полімерну матрицю за рахунок адгезійної взаємодії та виникнення водневих зв'язків. Встановлено, що композити на основі політетрафторетилену та полівініліденфториду, отримані за *in situ* методом суміщення їх вихідних компонентів мають на 10-20% кращий рівень фізико-механічних властивостей ніж аналоги, отримані за стандартним (механічним) методом. Що пояснюється кращою якістю розподілення силікагелю в об'ємі фторполімерів для композитів, отриманих за *in situ* методом.

У **п'ятому розділі** приведені результати трибологічних властивостей розроблених полімерних композитів. Визначено, що всі досліджені композити на основі фторполімерів, для запобігання передчасного виходу з ладу виробів із них, повинні проходити попереднє притирання впродовж 10 хвилин при навантаженні 0,75 МПа та швидкості ковзання 0,75 м/с. Встановлено, що температура на поверхні тертя композитів на основі фторполімерів має на 25-35% менші значення ніж аналогічний параметр при терті вихідних фторполімерів. При цьому найменщі її значення характерні для композитів на основі політетрафторетилену і лежать в інтервалі від 33-37°C. Визначено, що температура при терті композитів, що отримані за *in situ* суміщенням вихідних компонентів полімерних композицій має на 5-10°C менші значення ніж для аналогів, отриманих за стандартним методом суміщення.

Встановлено, що значення коефіцієнту тертя та інтенсивності лінійного зношування для розроблених композитів при їх фрикційній взаємодії із сталлю зменшуються на 45-50% та у 4-10 разів в залежності від використаної полімерної матриці у порівнянні із вихідними фторполімерами. Відповідно до мікрофотографій

сталевих поверхонь тертя до та після фрикційної взаємодії із фторполімерами та композитами на їх основі визначено, що відбувається зміна їх морфології в залежності від пари тертя полімер-сталь чи полімерний композит-сталь. Що є наслідком створенням на сталевій поверхні антифрикційного покриття (яке є результатом трибохімічних реакцій у зоні тертя), що складається із островків перенесення продуктів тертя по яких і здійснюється фрикційні взаємодія досліджених пар. Для підтвердження припущення щодо створення покриття на фрикційній поверхні були проведені дослідження її мікротвердості до та після тертя із фторполімерами та композитами на їх основі. Встановлено, що мікротвердість поверхонь після фрикційної взаємодії із композитами на 25% перевищує аналогічний показник для вихідної сталеві поверхні, що свідчить про наявність на поверхні ефекту орієнтації уздовж шляху тертя та підтверджує створення твердого покриття із продуктів зношування, яке сприяє покращенню антифрикційних властивостей пар тертя із розроблених полімерних композитів у порівнянні із аналогами з вихідними фторполімерами.

У **висновках** приведені основні результати досліджень, підтверджені досягнення мети та задач роботи, визначені напрями подальших досліджень.

У **додатку А** приведено список наукових праць за темою дисертації здобувача.

У **додатку Б** приведено акт промислових випробувань ущільнень з розроблених полімерних композиційних матеріалів на основі фторвмісних полімерів у вузол тертя та герметизації (манжетні ущільнення штоку) гідравлічного насоса моделі ДГ3739А3 на ТОВ ДНПРОПРЕС.

Ключові слова: фторполімери, політетрафторетилен, кополімер тетрафторетилену з етиленом, полівініліденфторид, силікагелю, полімерні композити, метод переробки у вироби, фізико-механчні та теплофізичні властивості, тертя, зношування .

ABSTRACT

Pikula I.I. "Composites Based on Fluoropolymers and Silicon Dioxide for Friction Units of Technological Equipment." Qualification Scientific Work (Manuscript Status). Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 161 – Chemical Technologies and Engineering.

Scientific and Educational Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology" of the Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, 2025.

The dissertation was carried out at the Department of Innovation Engineering of the Scientific and Educational Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology" of the Ukrainian State University of Science and Technology.

The dissertation addresses the problem of creating polymer composites obtained by modern processing methods, enabling a uniform distribution of filler within the polymer matrix. This leads to materials with sufficiently high physical-mechanical and thermophysical properties, suitable for use in friction units of technological equipment.

The relevance of the work is due to the shortage of tribotechnical materials capable of significantly reducing energy losses caused by friction in equipment units—from the current 23% to a minimum. This contributes to a substantial reduction in energy resource consumption (fossil fuels, electricity, etc.).

Object of research: experimental patterns in creating polymer composites based on fluoropolymers and silica gel for friction units of technological equipment.

Subject of research: fluoropolymers based on polytetrafluoroethylene, tetrafluoroethylene-ethylene copolymer, polyvinylidene fluoride, and silica gel, as well as methods for manufacturing products from these materials.

The introduction justifies the relevance of the research, outlines the aim, objectives, object and subject of the study, highlights scientific novelty and practical significance of the obtained results, and presents the connection with other scientific topics and the author's personal contribution.

Chapter One provides a literature review on tribotechnical materials for friction units of technological equipment. It discusses the most common bases (metals, alloys, non-metals) and justifies the use of fluoropolymers and their composites as promising materials. It also analyzes fillers and modifiers that enhance polymer properties, highlighting silicon dioxide as one of the best due to its high surface area and active silanol groups. These improve not only tribological but also mechanical and thermophysical properties. The chapter also reviews polymer processing methods, noting that the selected fluoropolymers can be processed using both high-productivity (injection molding, extrusion) and low-productivity (sintering, compression molding with heating) methods. Given the specific application in friction units (typically not mass-produced), sintering and compression molding with heating were selected for this study.

Chapter Two presents materials and methods used in the research. The polymer bases selected were: polytetrafluoroethylene (PTFE), tetrafluoroethylene-ethylene copolymer, and polyvinylidene fluoride (PVDF). Silica gel was chosen as the filler. The structural formulas, key properties, grades, and manufacturers of these materials are provided. The chapter also describes all experimental methods used, citing standards and the equipment involved.

Chapter Three presents experimental results for determining the best processing technique and optimal processing parameters for the fluoropolymer-based composites. Preparation, main, and final stages of processing are described. The preparation includes sieving, filler synthesis, component mixing, and briquetting. A novel in situ method of mixing components during silica gel synthesis is proposed, yielding 50–60% better filler dispersion compared to conventional mechanical mixing—positively impacting composite properties. The optimal briquetting pressure and holding time for strength and energy efficiency were found to be 25–30 MPa and 60–90 seconds, respectively. Based on the mechanical properties of the composites, optimal parameters for the main processing stage were identified: for tetrafluoroethylene-ethylene copolymer composites—270°C and 40 MPa; for PVDF-based composites—180°C and 40 MPa.

Chapter Four explores the effects of composition and processing methods on the developed composites' properties. It was shown that adding silica gel improves thermal

and heat resistance by 30–40°C and 6–16°C, respectively, depending on composition and method. This is attributed to polymer–filler interactions that limit molecular mobility under heat. Composites made using in situ mixing show 10–15°C and 1–6°C higher onset decomposition and Vicat softening temperatures than those made by standard mixing. Silica gel also improves mechanical properties: yield stress, compression modulus, and hardness increase by 25–55% for PTFE-based composites, 25–30% for tetrafluoroethylene-ethylene copolymer, and 30–35% for PVDF composites. These enhancements indicate physicochemical interactions between the filler and matrix. In situ composites show 10–20% better mechanical properties due to more uniform silica gel distribution.

Chapter Five presents tribological testing results. It was determined that all developed composites require 10 minutes of pre-running-in under a load of 0.75 MPa and a sliding speed of 0.75 m/s. Friction surface temperatures were 25–35% lower than those of pure fluoropolymers, with the lowest values (33–37°C) observed in PTFE-based composites. In situ composites showed 5–10°C lower friction temperatures compared to standard-mixed ones.

Friction coefficients and wear rates were reduced by 45–50% and 4–10 times, respectively, compared to pure fluoropolymers. Microphotography of steel surfaces before and after friction testing revealed morphological changes, attributed to the formation of anti-friction tribochemical transfer films. Surface microhardness tests confirmed the presence of these films: post-friction surfaces showed a 25% increase in hardness, supporting the hypothesis of oriented hard tribofilms that improve frictional performance of the developed composites over base polymers.

Conclusions summarize the main results, confirm the achievement of the research objectives, and identify future research directions.

Appendix A contains a list of scientific publications by the author related to the dissertation.

Appendix B includes the industrial testing report of sealing elements made from the developed fluoropolymer composites in the friction and sealing units (rod seals) of the DG3739A3 hydraulic pump at LLC DNIPROPRESS.

Keywords: fluoropolymers, polytetrafluoroethylene, tetrafluoroethylene-ethylene copolymer, polyvinylidene fluoride, silica gel, polymer composites, processing method, mechanical and thermophysical properties, friction, wear.

Наукові праці в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Kabat O. S., Derkach O. D., Pavlushkina N. V., Pikula I. I. Polymeric composites of tribotechnical purpose based on fluoropolymers // Problems of Tribology. – 2019. – Vol. 92, № 2. – P. 75–81. DOI: 10.31891/2079-1372-2019-92-2-75-81 (**фахове видання**);

Особистий внесок здобувача: збір та аналіз експериментальних даних, обговорення результатів, формування статті та підготовка її до друку.

2. Пікула І. І., Кабат О. С. Визначення оптимальних технологічних параметрів брикетування фторполімерів // Питання хімії та хімічної технології. – 2024. – № 2. – С. 70–74. DOI: 10.32434/0321-4095-2024-153-2-70-74. (**Scopus + фахове видання**);

Особистий внесок здобувача: постановка задачі дослідження, збір та аналіз експериментальних даних, обговорення результатів, формування статті та підготовка її до друку.

3. Пікула І. І., Кабат О. С. Визначення оптимальних технологічних параметрів перероблення фторполімерів // Питання хімії та хімічної технології. – 2024. – № 4. – С. 34–40. DOI: 10.32434/0321-4095-2024-155-4-34-40. (**Scopus + фахове видання**);

Особистий внесок здобувача: збір та аналіз експериментальних даних, обговорення результатів, підготовка статті до друку.

4. Кабат О. С., Пікула І. І. Композити на основі фторполімерів та метод їх переробки у вироби// Питання хімії та хімічної технології. – 2025. – № 2. – С. 67–74. DOI: 10.32434/0321-4095-2025-159-2-67-74. (**Scopus + фахове видання**);

Особистий внесок здобувача: збір та аналіз експериментальних даних, обговорення результатів, підготовка статті до друку.

5. Пікула, І. І. Визначення оптимальних технологічних параметрів при переробці прес порошків на основі фторопласта- // IX Міжнародна науково-технічна конференція «ХІМІЯ ТА СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ» - (м. Дніпро, 24 – 26 квітня 2019 р). - С. 39;

Особистий внесок здобувача: збір та аналіз експериментальних даних, обговорення результатів, підготовка тез до друку.

6. Ситар В.І., Кабат О.С., Пікула І.І., Кудрявцев А.В. Композиційні матеріали на основі термостійких полімерів багатофункціонального призначення / Х

Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Хімія та сучасні технології», Том 2, - (м. Дніпро, 2021). – С. 139-140;

Особистий внесок здобувача: збір та аналіз експериментальних даних, обговорення результатів, підготовка тез до друку.

7. Кабат О. С., Пікула І. І., Сула М.П. Фторполімери для вузлів тертя машин і механізмів// Матеріали І Міжнародної наукової конференції «Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів» (м. Дніпро, 20 травня 2022 р.). – С. 65-67;

Особистий внесок здобувача: збір та аналіз експериментальних даних, обговорення результатів, підготовка тез до друку.

8. Кабат О. С., Пікула І. І. Технологія переробки фторполімерів у виробі // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики» (м. Тернопіль, 29–30 вересня 2022 р.). – С. 139–140. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/39025/2/MNPK_2022_Kabat_O_S-Technology_of_processing_fluorpolymers_139.pdf (дата звернення: 11.06.2025);

Особистий внесок здобувача: збір та аналіз експериментальних даних, обговорення результатів, підготовка тез до друку.

9. Ковба А. О., Пікула І. І., Кабат О. С. Фторполімери для вузлів тертя сучасних машин і механізмів // Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів і молодих учених “Наука і сталий розвиток транспорту 2023” (м. Дніпро, 27 жовтня 2023). С. 85–86. URL: https://nmetau.edu.ua/file/2_tom_2.pdf (дата звернення: 11.06.2025);

Особистий внесок здобувача: збір та аналіз експериментальних даних, обговорення результатів, підготовка тез до друку.

10. Pikula I.I., Kabat O.S. Nanofilled fluoropolymers for tribological purposes // International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials”(Bukovel, 16-19 of August 2023) – P. 127;

Особистий внесок здобувача: збір та аналіз експериментальних даних, обговорення результатів, підготовка тез до друку.

11. Пікула І. І., Кабат О. С. Вплив хімічної структури фторполімерів на температуру розм'якшення по Віка // Тези доповідей XI міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Хімія і сучасні технології» (м. Дніпро, 06 – 07 грудня 2023). Т. 2. – С. 125–126;

Особистий внесок здобувача: збір та аналіз експериментальних даних, обговорення результатів, підготовка тез до друку.

12. Пікула І., Кабат О. Визначення температури термічної деструкції композитів на основі фторполімерів // Міжнародна науково-технічна конференція “Перспективні полімерні матеріали та технології” (м. Львів, 2024). – С. 76.

Особистий внесок здобувача: збір та аналіз експериментальних даних, обговорення результатів, підготовка тез до друку.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УСЛОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	16
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1 МАТЕРІАЛИ ТРИБОТЕХНІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ДЛЯ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	21
1.1 Метали та їх сплави.....	23
1.2 Неметали.....	25
1.3 Наповнювачі, модифікатори для полімерів триботехнічного призначення.....	34
1.4 Методи переробки полімерів та композитів на їх основі у вироби	40
РОЗДІЛ 2 ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	48
2.1 Об'єкти досліджень.....	48
2.2 Методи досліджень.....	50
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ПЕРЕРОБКИ ФТОРПОЛІМЕРІВ У ВИРОБИ	55
3.1 Підготовчий етап переробки.....	59
3.1.1 Просіювання вихідних полімерів.....	60
3.1.2 Синтез наповнювача.....	63
3.1.3 Суміщення вихідних компонентів полімерної композиції.	67
3.1.4 Брикетування полімерних композицій та визначення оптимальних параметрів брикетування.....	73
3.2 Основний етап переробки.....	77
3.2.1 Обґрунтування оптимальної температури переробки.....	78
3.2.2 Обґрунтування оптимального тиску при переробці.....	83
3.3 Заключний етап переробки.....	85
РОЗДІЛ 4 ВПЛИВ СКЛАДІВ ТА МЕТОДІВ ПЕРЕРОБКИ НА ВЛАСТИВОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ ПОЛІМЕРНИХ	88

КОМПОЗИТИВ.....	
4.1 Теплофізичні властивості.....	93
4.2 Фізико-механічні властивості.....	99
РОЗДІЛ 5 ВИЗНАЧЕННЯ ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОЗРОБЛЕНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТИВ.....	102
5.1 Вибір режимів притирання розроблених композитів.....	103
5.2 Температура на поверхні тертя.....	109
5.3 Коефіцієнт тертя та інтенсивність лінійного зношування.....	112
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	123
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	126
ДОДАТОК А. Акт впровадження у виробничий процес результатів дисертаційної роботи.....	143
ДОДАТОК Б. Список наукових праць за темою дисертації.....	

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УСЛОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

КТФЕ – кополімер тетрафторетилену з етиленом;

ПВДФ – полівініліденфторид;

ПК – полімерний композит;

ПТФЕ – політетрафторетилен;

ρ - Густина;

σ_y – Напруження при межі текучості при стисканні;

E – Модуль пружності;

НВ – твердість за Бринеллем;

НV – мікротвердість;

T_{VC} - Температура розм'якш. за методом Віка;

α – коефіцієнт термічного лінійного розширення;

f – коефіцієнт тертя;

I_h - інтенсивність лінійного зношування;

T - температура на поверхні тертя.

ВСТУП

Актуальність досліджень обумовлена нестачею матеріалів триботехнічного призначення, які працюючи у вузлах тертя технологічного обладнання здатні значно зменшити витрати енергії на подолання тертя із теперішніх 23% до мінімуму, що сприятиме значному зменшенню витрат енергетичних ресурсів (викопне паливо, електрична енергія тощо) необхідних для його роботи.

Мета роботи полягає у розробці полімерних композитів із достатньо високим рівнем фізико-механічних та теплофізичних властивостей на основі фторполімерів та методики їх виготовлення для вузлів тертя технологічного обладнання.

Для досягнення визначеної мети необхідно вирішити такі **задачі**:

- обґрунтувати вибір полімерних основ та наповнювачів для створення полімерних композитів із достатньо високим рівнем фізико-механічних та теплофізичних властивостей для вузлів тертя технологічного обладнання;
- розробити методику отримання полімерних композитів із високою якістю розподілення наповнювачів у об'ємі полімеру та визначити оптимальні значення їх основних параметрів переробки у виробі;
- визначити вплив складів та методів переробки композитів на їх теплофізичні та фізико-механічні властивості;
- визначити оптимальний час притирання розроблених композитів при фрикційній взаємодії із сталеву поверхню та встановити вплив їх складів та методів переробки на трибологічні властивості із визначенням характеру тертя та зношування.

Об'єкт дослідження: експериментальні закономірності створення полімерних композитів на основі фторполімерів і силікагелю для вузлів тертя технологічного обладнання.

Предмет дослідження: фторполімери на основі політетрафторетилену, кополімеру тетрафторетилену з етиленом, полівініліденфториду і силікагелю та методи виготовлення виробів із них.

Наукова новизна роботи полягає у створенні полімерних композитів на основі політетрафторетилену, кополімеру тетрафторетилену з етиленом,

полівініліденфториду і силікагелю та методу їх переробки у вироби із можливістю спрямованого регулювання фізико-механічних, теплофізичних і трибологічних властивостей та отримання на їх основі виробів триботехнічного призначення, які зберігатимуть високий рівень експлуатаційних властивостей при відносно високому рівні навантажень та швидкостей ковзання.

Вперше отримані полімерні композити на основі фторполімерів (кополімер тетрафторетилену з етиленом, поліфінліденфторид), які наповнені дрібнодисперсним силікагелем, отриманим за допомогою підкислення водяного розчину метасилікату натрію.

Розроблено методику *in situ* суміщення вихідних компонентів полімерних композицій на основі фторполімерів для отримання полімерних композитів із високою якістю розподілення наповнювача силікагелю у об'ємі полімеру.

Вперше визначено оптимальні технологічні параметри (тиск та час витримки під тиском при брикетуванні, температура та тиск при пресуванні) на підготовчому та основному етапі переробки фторполімерів при їх компресійному пресуванні у формах із підігрівом.

Вивчено вплив складів та методів переробки розроблених полімерних композитів на їх рівень фізико-механічних, теплофізичних й триботехнічних властивостей із подальшою можливістю цілеспрямованого регулювання властивостей розроблених матеріалів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні композитів на основі фторполімерів (політетрафторетилену, кополімеру тетрафторетилену з етиленом, полівініліденфториду) та діоксиду кремнію силікагелю та технології їх переробки у вироби, яка дозволяє отримувати матеріали із рівномірно розподіленим наповнювачем в об'ємі полімеру. Відповідно до неї запропоновано відмовитися від операції механічного суміщення вихідних компонентів полімерних композицій на підготовчому етапі переробки у вироби і проводити їх суміщення (*in situ*) в процесі синтезу наповнювача. Це дозволило значно спростити і здешевити метод отримання виробів на основі фторполімерів та силікагелю і сприяло покращенню якості

розподілення силікагелю у полімерних матрицях за рахунок їх суміщення на молекулярному рівні.

Розроблені фторполімери на основі політетрафторетилену, кополімеру тетрафторетилену з етиленом, полівініліденфториду і силікагелю, деталі з яких здатні працювати у конструкціях вузлах машин і механізмів при навантаженнях до 70 МПа та температурах до 400°C. При цьому граничні значення навантаження, швидкості ковзання та температури при якій вироби із розроблених фторполімерів здатні працювати у вузлах тертя технологічного обладнання зберігаючи їх високий рівень фізико-механічних властивостей становлять $P = 0,75$ МПа, $V = 0,75$ м/с та 180°C відповідно.

Практичне значення підтверджено результатами промислових випробувань ущільнень з розроблених полімерних композиційних матеріалів на основі фторвмісних полімерів у вузлі тертя та герметизації (манжетні ущільнення штоку) гідравлічного насоса моделі ДГ3739А3 на ТОВ ДНІПРОПРЕС. Відповідно до цього було отримано акт впровадження результатів роботи у промисловість.

Особистий внесок здобувача. Полягає в систематизації та критичному аналізі літературних джерел за темою дисертаційного дослідження, проведенні експериментальних досліджень, обробці та аналізі одержаних результатів, формулюванні висновків, підготовці доповідей, статей, тез конференцій тощо. Формулювання мети роботи, завдань та об'єктів дослідження, інтерпретація та узагальнення результатів досліджень, формулювання висновків здійснено спільно з науковим керівником – д.т.н., професором Кабат О.С. Внесок співавторів спільних публікацій полягає у виборі методики експериментів, обговоренні результатів роботи при підготовці публікацій. Дисертаційна робота Пікули Івана Івановича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів плагіату та запозичень (Оригінальність 93%, відсоток подібності – 7%). Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи були представлені на IX, X, XI Міжнародній науково-технічній конференції «ХІМІЯ ТА СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ» - (м. Дніпро, 2019,

2021, 2023 р.); I-й Міжнародній науковій конференції «Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів» (м. Дніпро, 2022 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики» (м. Тернопіль, 2022 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів і молодих учених “Наука і сталий розвиток транспорту 2023” (м. Дніпро, 2023 р.); International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials”(Bukovel, 2023 yr.); Міжнародній науково-технічній конференції “Перспективні полімерні матеріали та технології” (м. Львів, 2024).

Публікації. Основні положення та наукові результати дисертаційної роботи опубліковано у 12 наукових працях. З яких 4 статті у фахових виданнях України (3 з них у журналах, що індексуються у Scopus) та 8 тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських конференціях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із анотації на двох мовах (українська та англійська), вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку літературних джерел та додатків. Загальний об’єм дисертації становить 144 сторінку, на яких 59 рисунків, 6 таблиць та 141 посилання на літературні джерела.

РОЗДІЛ 1

МАТЕРІАЛИ ТРИБОТЕХНІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ДЛЯ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Сучасне технологічне обладнання споживає велику кількість енергії, яка витрачається на його стабільну та довговічну роботу. При цьому до 23% витрат енергії припадає на подолання тертя у триботехнічних парах [1]. Тому досить актуальним є розробка та впровадження таких матеріалів пар тертя, які сприяють значному зменшенню тертя та зношування у фрикційних парах. За рахунок чого можна не тільки підвищити надійність та довговічність у роботі машин і механізмів, а і значно зменшити споживання енергії, яке витрачається на їх роботу [2,3].

Матеріали триботехнічного призначення працюють в вузлах тертя сучасних машин та апаратів в умовах тертя без та із змащуванням, при дії абразивних частинок, хімічно активних середовищ тощо. При цьому ці матеріали повинні забезпечувати високий рівень надійності та довговічності вузлів тертя в цілому за рахунок їх супротиву зношуванню та перегріву та безвідмовній роботі при високому рівні навантажень та швидкостей ковзання.

До триботехнічних матеріалів відносять антифрикційні та фрикційні.

Антифрикційні матеріали – це ті, які мають низький коефіцієнт тертя і низьку зношуваність при терті. Фрикційні матеріали відрізняються здатністю працювати у високій діпазоні температур із коефіцієнтом тертя більшим за 0,5, високою корозійною стійкістю і вогнебезпечністю, високою зностостійкістю і міцністю. У даній роботі розглядали саме матеріали антифрикційного призначення внаслідок їх більш широкого спектру застосування у вузлах тертя машин і механізмів технологічного обладнання.

Антифрикційність є основною властивістю матеріалів трибологічного призначення. Антифрикційність - це властивість матеріалу підтримувати низький коефіцієнт ковзання і малу швидкість зношування поверхні тертя. В окремих

випадках, до цього додаються умови роботи в різних середовищах, наприклад мати достатній опір корозії при роботі в агресивному середовищі тощо.

Згідно з І.В. Крагельським, основною характеристикою антифрикційної пари тертя є її здатність створювати позитивний градієнт механічних властивостей на поверхні, що зменшує об'ємне деформування до мінімуму. Це означає, що в контакті поверхні, змащені спеціальними матеріалами, можуть зберігати свою структуру майже незмінною, навіть при певному рівні пластичної деформації. Це дозволяє їм багаторазово піддаватися деформації без втрати міцності, що убезпечує від їхнього руйнування або зносу від дії тертя.

Основних вимоги до антифрикційних матеріалів приведені на рисунку 1.



Рисунок 1 - Основні вимоги до антифрикційних матеріалів

Більша частина антифрикційних матеріалів являють собою композиції, які складаються із основи, яка наповнена чи модифікована матеріалами різної природи та морфології, які, у свою чергу, рівномірно розподілені в основі за правилом Шарпі [4]. У випадку, коли такі матеріали більш тверді ніж основа, то вони сприймають на себе навантаження при терті та передають його на основу, знижуючи при цьому контактний тиск на місця локального тертя матеріалів при фрикційній взаємодії. У випадку, коли наповнювачі та модифікатори більш м'які, то роль силового каркасу матеріалу виконує основа, а вони, у більшості випадків, виконують роль

модифікаторів поверхні тертя, створюючи на ній покриття, яке сприяє зміні характеру тертя.

Згідно класифікації несучої здатності матеріалів, яка розроблена в Інституті проблем матеріалознавства НАН України режими роботи поділяють на 4 режими: легкий, середній, важкий та гранично важкий [5].

Легкий режим роботи характеризується тим, що на поверхнях, які знаходяться у контакті, утворюється тонкий мастильний шар, а навантаження та швидкості ковзання є невеликими, що не призводить до збільшення температури у зоні тертя.

Середній режим характеризується встановленням вищих параметрів навантажень і швидкостей або збільшенням терміну служби підшипникового вузла. Це призводить до того, що шар змащення стає тоншим, а матеріал підшипника активніше взаємодіє у процесі тертя.

Важкий режим визначається, коли навантаження та швидкості досягають великих значень, і зазвичай в зоні тертя недостатньо змащення. Ефективність роботи тертя в цьому випадку переважно залежить від властивостей контактуючих матеріалів. Внаслідок чого температура вузла тертя.

Гранично важкий режим охоплює умови роботи вузлів тертя, де відсутнє рідке мастило, що зазвичай необхідне для високих температур та швидкостей ковзання при різних рівнях навантаження. Він може включати роботу в умовах вакууму, у середовищах інертних або активних газів, рідких середовищ та інших подібних умовах.[4]

Усім цим режимам роботи задовільняють антифрикційні матеріали на металевій та неметалевій основах.

1.1 Метали та їх сплави

До матеріалів на металевій основі відносяться металеві сплави на основі олова і свинцю, міді, алюмінію, цинку, заліза, нікелю, кобальту тощо [6-8]

Матеріали на металевій основі мають досить високий рівень фізико-механічних та теплофізичних властивостей, яких із великим запасом достатньо для

використання, як у легко так і важконавантажених вузлах тертя машин і механізмів. Однак при цьому більшість з них можуть працювати у вузлах тертя, які працюють із змащуванням.

Матеріали на основі олова і свинцю – застосовуються у вузлах тертя дизелів, парових турбін тощо [9]. До переваг цих матеріалів слід віднести досить непогане припрацювання при фрикційній взаємодії із сталлю [10,11]. До недоліків олова та свинцю слід віднести їх відносно низький рівень зносостійкості та твердості, поряд із високою собівартістю виготовлення деталей, що зумовлює їх використання лише у вузлах тертя відповідального призначення.

Матеріали на основі міді застосовуються у важконавантажених вузлах тертя технологічного обладнання (підшипники ковзання і кочення, напрямні втулки тощо), які працюють при атмосферному тиску та у вакуумі [12,13]

Причому вони можуть використовуватися, як конструкційний матеріал для виготовлення елементів вузлів тертя [14] так і в якості присадок до мастил [15].

До переваг таких матеріалів слід віднести їх високий рівень зносостійкості та невисокі значення тертя та температури на поверхні тертя при фрикційній взаємодії із сталлю [16,17]. Із недоліків слід відмітити їх неможливість роботи у фрикційних вузлах, які працюють без змащування та відносно високий рівень собівартості виготовлення виробів з них.

Матеріали на основі алюмінію застосовують у вузлах тертя двигунів внутрішнього згорання [18,19]. До переваг можна віднести – невеликі значення густини, високі значення жароміцності, зносостійкості і теплопровідності.

Матеріали на основі цинку не мають широко застосування у машинобудівництві, зазвичай їх використовують у вузлах тертя зазізничного транспорту [20, 21]. До їх переваг можна віднести високу припрацьовуваність і технологічність, однак вони мають не високий рівень трибологічних властивостей.

Матеріали на основі заліза використовуються у багатьох галузях машинобудування, але через їх низькі значення трибологічних властивостей (навіть при терті із змащуванням) вони досить рідко використовуються у вузлах тертя машин і механізмів [22]. Залізо часто використовується, як один із компонентів

складних металевих сплавів [23, 24], що мають досить високий рівень трибологічних властивостей.

Із недоліків матеріалів на основі заліза слід відмітити їх високу твердість, низька припрацьовуваність, низький рівень трибологічних властивостей.

Матеріали на основі нікелю і кобальту у більшості випадків використовуються в якості покриттів поверхонь тертя і попри свої низькі антифрикційні властивості їх часті застосовують у вузлах тертя, які працюють при дії з агресивних середовищ [25,26]. До їх переваг можна віднести – високу корозійну стійкість, високу міцність. До недоліків – низькі антифрикційні властивості при роботі у сухому режимі, високу схоплюємість і пластичність.

Виходячи із наведеної вище інформації можна зробити висновок, що більшість матеріалів на металевій основі мають досить високий рівень фізико-механічних властивостей і працюють у вузлах тертя (навіть у важко навантажених) тільки при наявності змащення. Це потребує додаткових витрат на організацію системи змащування таких вузлів, що значно здорожує собівартість машин і механізмів. Тому використання таких матеріалів у сучасному обладнанні не є економічно виправданим.

1.2 Неметали

До антифрикційних матеріалів на неметалевій основі відносяться полімерні матеріали (термо- та реактопласти, гума, деревина, вуглецеві матеріали).

Вони мають унікальну будову, що відрізняється від традиційних твердих тіл у двох основних аспектах. По-перше, вони складаються з довгих ланцюгових молекул з відмінними видами зв'язків між ними та вздовж них. По-друге, ці матеріали відрізняються наявністю двох основних структурних одиниць: ланцюгів молекул та сегментів, які можуть діяти незалежно один від одного у різних ситуаціях. Ця особливість полімерів формує унікальний комплекс їхніх властивостей.

Фізико-механічні властивості полімерів визначаються не лише структурою макромолекул, а також характером функціональних груп, розміром та розподілом ланцюгів полімерів, їх взаєморозташуванням, присутністю і формою відгалужень, а також фазовим та фізичним станом матеріалу та іншими факторами.[6]

Як значилось вище, полімерні антифрикційні матеріали мають низку переваг. розглянемо їх детальніше. Антифрикційні властивості полімерних матеріалів обумовлені: утворенням адгезійних вузлів між парами тертя; входженням вершин однієї поверхні в іншу; неідеальною пружністю полімерів, що призводить до втрати тертя. Схильність полімерів до утворення адгезійних вузлів менша ніж у металів, вони здатні на більші пружні деформації. тому в зонах контакту поверхонь може бути відсутнім інтенсивна течія полімеру, що полегшує їх адгезійне зчеплення.

Застосування полімерних антифрикційних полімерів обмежується: високим коефіцієнтом розширення, низькою теплопровідністю, низькою твердістю; низьким модулем пружності [27].

Недоліки полімерів нівелюються додаванням у них різних за природою та морфологією наповнювачів, модифікаторів тощо.

Полімери розділяються на дві основні групи: термопластичні і термореактивні., це обумовлено різницею у засобах або режимах їх переробки. а також у властивостях. До термопластичних відносять матеріали з лінійною або розгалуженою структурою полімерів, які можуть змінювати свої властивості під впливом температури під час послідовних циклів нагрівання та охолодження. У термореактивних пластмас реакції між ланцюговими молекулами відбуваються при високій температурі, утворюючи міцну сітчасту структуру. Ці полімери не можуть стати пластичними при підвищенні температури без руйнування хімічних зв'язків у структурі полімеру.

Полімери та композити на їх основі застосовуються для виготовлення різноманітних деталей, таких як зубчасті колеса, шківни, елементи підшипників ковзання, кулачкові механізми, напрямні, ущільнення, сепаратори для шарикопідшипників, втулки для шарнірів тощо [28].

До найбільш розповсюджених термопластичних полімерів трибологічного призначення відносяться: фторполімери, поліаміди, полііміди, поліефіри, полісульфони тощо.

Фторполімери набули широкого застосування у машинобудіванні завдяки високому рівню антифрикційних властивостей. До переваг таких полімерів слід віднести їх найкращу стійкість до дії агресивних середовищ серед усіх полімерів (набухають та розчиняються тільки при дії деяких органічних розчинників, суміші концентрованих азотної і соляних кислот тощо), високим рівнем термічної стійкості (до 450°C), невеликими значеннями коефіцієнту тертя (до 0,2) при фрикційній взаємодії із сталлю та одною із найкращих зносостійкостей (до 100×10^{-9} м/м) із відомих полімерів [29]. Однак фторполімери мають досить невисокий рівень фізико-механічних властивостей (10-60 МПа) і тому вони майже не використовуються у вихідному вигляді у вузлах машин і механізмів [30-32]. Однак використання композитів на основі фторполімерів у вузлах тертя машин і механізмів набуло досить широке розповсюдження [33,34].

Поліаміди, які використовуються у вузлах тертя мають аліфатичні та ароматичні молекули [35]. Деталі із них досить суттєво відрізняються по рівню властивостей одна від одної і кожен із цих матеріалів має свої переваги та недоліки. Деталі з аліфатичних поліамідів відрізняються досить високим рівнем міцності до 120 МПа, можуть працювати у вузлах тертя при температурах до 120-140°C, забезпечуючи при цьому їх високий рівень надійності та довговічності [36,37]. Із недоліків аліфатичних поліамідів слід відмітити їх не дуже високий рівень трибологічних властивостей та відносно високу собівартість виготовлення деталей.

Ароматичні поліаміди відрізняються значно вищим рівнем властивостей ніж аліфатичні. По своїх фізико-механічних властивостях вони наближаються до низьковуглецевих сталей. Деталі з них здатні витримувати навантаження до 250 МПа і працювати при температурах до 250°C [38]. Ароматичні поліаміди, які наповнені дисперсними чи волокнистими наповнювачами відрізняються досить високим рівнем трибологічних властивостей (коефіцієнт тертя до 0,15, інтенсивність лінійного зношування до 2×10^{-9} м/м) [39, 40]. При цьому деталі із даних матеріалів

здатні працювати у вузлах тертя, зберігаючи при цьому їх високий рівень надійності та довговічності при навантаженнях до 2 МПа та швидкостях ковзання до 1,5 м/с. Із основних недоліків ароматичних поліамідів слід віднести їх досить складну технологію переробки у вироби та високу собівартість виготовлення виробів із них.

Як і полііміди поліаміди бувають також аліфатичними та ароматичними. Аліфатичні поліаміди відрізняються досить високим рівнем фізико-механічних та теплофізичних властивостей. Їх міцність при стисканні може доходити до 200, а модуль пружності до 3000 МПа, при значеннях густині до 1400 кг/м³ [41,42]. Такі матеріали мають досить непоганий рівень трибологічних властивостей. Їх коефіцієнт тертя не перевищує 0,3 при навантаженнях до 1 МПа [43].

Ароматичні поліаміди завдяки кращому рівню властивостей та можливості роботи у більш широких інтервалах навантажень, температур тощо отримали більше розповсюдження ніж аліфатичні. Їх міцність може наближатися до 300 МПа, а термостійкість до 400оС [35].

Як аліфатичний, так і ароматичні поліаміди мають досить високу хімічну стійкість. Вироби із них працюють у багатьох активних середовищах зберігаючи при цьому свій високий рівень надійності та довговічності [44, 45]

Завдяки тому, що ці матеріали є досить дорогими, то досить часто у машинах і механізмах використовуються покриття на їх основі [46,47], що досить суттєво впливає на собівартість їх вузлів. Також для здешевлення деталей на основі поліамідів роблять пористими, зберігаючи при цьому досить високий рівень їх експлуатаційних властивостей [48].

До основних недоліків аліфатичних та ароматичних поліамідів слід віднести їх високу собівартість і досить складну технологію переробки у вироби (стосується у більшій ступені ароматичних поліамідів, які мають високий рівень властивостей).

Поліефіри – це полімери, які мають ароматичні фрагменти у цепі. Вони мають досить високий рівень фізико-механічних властивостей. Так при густині до 1500 кг/м³ напруження при межі текучості та модуль пружності при стисканні досягають 160 та 3800 МПа відповідно [49,50]. При цьому ці полімери не підлягають термічній деструкції при температурах до 380оС, а деталі з деяких з них можуть працювати у

вузлах машин і механізмів при температурах до 200°C зберігаючи високий рівень своїх властивостей. Також слід відмітити досить високий рівень їх трибо логічних властивостей при фрикційній взаємодії із сталлю, як при терті у режимі без так і зі змащуванням [51, 52]. Так у вихідному вигляді поліефіркетони мають коефіцієнт тертя до 0,3 при невисокому рівні навантажень. При цьому деталі із цих полімерів досить часто використовуються у важко- та температуронавантажених вузлах машин і механізмів [53], забезпечуючи їх високий рівень надійності та довговічності.

До основних недоліків поліефіркетонів слід віднести їх відносно високу собівартість і складність переробки у вироби.

Полісульфони являють собою досить широкий спектр полімерів (полісульфони, поліефірсульфони, поліарілсульфони), деталі з яких можуть працювати у вузлах машин і механізмів при температурах до 250°C, зберігаючи при цьому високий рівень фізико-механічних та теплофізичних властивостей. При цьому слід відмітити, що такі матеріали мають досить невисоку міцність. Так їх напруження при межі текучості при стисканні досягає значень 110 МПа при густині до 1400 кг/м³. Матеріали із полісульфонів мають досить високий коефіцієнт тертя при фрикційній взаємодії із сталлю до 0,4. Тому вони досить рідко використовуються у вихідному вигляді [54,55]. Також слід відмітити, що матеріали на основі полісульфонів досить чутливі до якісного притирання деталей, що вступають у фрикційну взаємодію [56]. Тому неналежне притирання може призвести до завчасного їх виходу із ладу.

Завдяки тому, що полісульфони мають досить високі температури переходу у в'язкотекучий стан (320-420°C) та високу в'язкість розплаву (до 1050 Па·с при температурах переробки) їх технологія переробки у вироби досить складна та коштовна, що значно обмежує їх широке використання в якості деталей машин і механізмів.

До термореактивних полімерів, які використовуються у вузлах тертя відносяться: фенольні, епоксидні смоли тощо.

Фенольні полімери являють собою високомолекулярні з'єднання на основі феноло-альдегідних, феноло-формальдегідних смол тощо. У вихідному вигляді для виготовлення деталей машин і механізмів вони практично не використовуються [57]. Їх наповнюють різноманітними за природою, морфологією та складом матеріалами, створюючи при цьому досить міцні до 200 МПа та термостійкі (до 600°C) полімерні композити [57]. Данні матеріали відрізняються досить суттєвою стійкістю до дії різноманітних зовнішніх факторів, таких, як активні середовища, волога тощо. Це обумовлено їх внутрішньою структурою.

Деталі, виготовленні на основі фенольних пластиків, завдяки тому, що вони не розм'якшуються та не плавляться під тепловою дією, можуть працювати при досить високих температурах не зазнаючи суттєвої зміни властивостей [58]. Однак данні полімери мають досить високі значення тертя та зношування при фрикційній взаємодії із сталлю і у вузлах тертя використовуються тільки при неможливості використання інших матеріалів.

Ще одним досить суттєвим недоліком фенольних полімерів є небезпека пов'язана із випаровуванням з них вільного фенолу та формальдегіду, які мають досить негативний вплив на навколишнє середовище та організм людини і при перевищенні межево-допустимих концентрації можуть сприяти значному погіршенню здоров'я людини [59].

Ще одним термореактивним полімером, який використовується у вузлах тертя є епоксидні смоли. Ці матеріали, як і фенольні у більшості випадків наповнюються різноманітними матеріалами для створення деталей із прийнятним рівнем властивостей [60]. Причому їх ступінь наповнювання може сягати 95%. Полімерні композити на основі епоксидних смол мають досить високі значення фізико-механічних та теплофізичних властивостей. Значення їх напруження при межі текучості та модуля пружності при стисканні досягають 200 та 3500 МПа при густині до 2000 кг/см³ [57,61]. Ці матеріали можуть працювати у агресивних середовищах, і вакуумі в межах температур від -100 до 200°C.

Зважаючи на те, що епоксидні матеріали мають досить високі значення тертя при взаємодії із сталевими поверхнями, їх досить рідко використовуються у таких

вузлах тертя, як підшипники ковзання та кочення, напрямні тощо. Однак ці матеріали знайшли досить широке розповсюдження в якості захисних покриттів машин і механізмів, які піддаються дії газоабразивного зношування [62,63].

Існують вузли тертя, де використовується в якості матеріалів фрикційної пари гума. Гума – це полімерний матеріал, який є продуктом вулканізації каучуків. Вони є полімерними матеріалами, які відрізняються властивістю до великих обернених деформацій, які часто називаються високоеластичними [64]. Завдяки своєму унікальному набору властивостей гуми часто використовуються у вузлах герметизації машин і обладнання. Звичайно в таких вузлах часто відбувається не тільки герметизація, а і тертя (наприклад манжетні, торцові ущільнення тощо) [65,66]. Досить часто гуми використовують в якості захисних покриттів поверхонь, які піддаються газо-абразивному зношуванню [67].

Гуми із найбільшими значеннями твердості можна використовувати і у класичних вузлах тертя (підшипники ковзання, кочення, напрямні тощо), однак більшість деталей з них не здатні забезпечувати високий рівень надійності та довговічності при терті без змащування.

В сучасних вузлах тертя машин і механізмів, які працюють при високому рівні температур та при наявності активних газових чи рідинних середовищ використовують вуглець-вуглицеві матеріали. Вони відрізняються високими значеннями твердості до 300 МПа та міцності при стисканні до 200 МПа [68]. Однак є досить чутливими до ударних та знакоперемінних навантажень. Такі матеріали витримують температури до 700^оС із збереженням високого рівня властивостей [69]. При терті можуть працювати тільки при змащуванні і при цьому сприяють значному зношуванню металевого зразка по якому вони труться.

Також одним із матеріалів, які використовуються у вузлах тертя є деревина. Але в сучасному технологічному обладнанні у вузлах тертя цей матеріалів використовується досить рідко [70]. Деревина має характерну структуру схожу на полімери, що дозволяє суттєве модифікування її фізико-механічних показників. Для їх поліпшення проводять хімічну обробку або пропитку маслами. Зараз деревина

використовується для виготовлення ущільнень, направляючих, зубчастих коліс, тощо. [71]

Відповідно до проведеного літературного огляду можна стверджувати, що найбільш перспективними до використання у вузлах тертя машин і механізмів є полімери та полімерні композиційні матеріали на їх основі. Ці матеріали мають ряд унікальних властивостей, які досить вигідно відрізняють від інших. Так при невисоких значеннях густини (до 2000 кг/м³) полімери мають досить високі значення фізико-механічних властивостей (напруження при межі текучості при стисканні до 260 МПа, модуль пружності до 3500 МПа, твердість за Бринелем до 230 МПа). При цьому деякі з них є досить стійкими до дії теплового потоку і починають розкладатися при температурах більше 430°C. Слід виділити унікальну стійкість полімерів та композитів на їх основі до дії агресивних середовищ (деякі з полімерів розкладаються тільки під дією сумішей концентрованих кислот). Також одним із основних відмінностей більшості полімерів від інших матеріалів є їх можливість роботи у вузлах тертя без змащування чи у режимах граничного змащування. Відповідно до цього у роботі для розробки матеріалів для вузлів тертя будуть використовуватися матеріали на основі полімерів.

У таблиці 1 приведено зведений рівень властивостей розглянутих полімерів.

Таблиця 1 – Фізико-механічні, теплофізичні та трибологічні властивості полімерів антифрикційного призначення

Властивості	Показники властивостей полімерів						
	фторпо-лімери	поліаміди	Полііміди	Поліефіри	Полісульфони	Фенопласти	Епоксиди
Густина ρ , кг/м ³	2200	1400	1500	1500	1400	1600	1400
Напруження при межі текучості при стисканні σ_y , МПа	30	220	150	160	110	160	150

Продовження таблиці 1

Властивості	Показники властивостей полімерів						
	фторпо-лімери	поліаміди	Поліімі-ди	Поліефі-ри	Полісуль-фони	Феноп-ласти	Епо-киси
Модуль пружності при стисканні E, МПа	1050	3000	4000	3900	3900	4200	4300
Твердість НВ, МПа						270	280
Температура розм'якш. за методом Віка T _{VC} , °C	150	270	260	220	250	-	-
Температура початку активної деструкції, °C	450	350	400	400	410	360	-
Коефіцієнт тертя <i>f</i>	0,20	0,30	0,35	0,30	0,40	0,50	0,55
Інтенсивність лінійного зношування, I _h ×10 ⁻⁹ м/м	5	20	44	50	40	60	80
Температура на поверхні тертя T, °C	60	140	120	150	140	145	155

Відповідно до результатів таблиці, та вищезазначеним перевагам та недолікам полімерів антифрикційного призначення нами для подальших досліджень було обрано фторполімери, які мають найкращий рівень триботехнічних властивостей із всіх представлених полімерів.

Однак дані матеріали мають ряд недоліків (невисокі значення фізико-механічних та теплофізичних властивостей), відносно висока собівартість виготовлення деталей з них. У роботі ці недоліки будуть усуватися шляхом модернізації методики отримання виробів із фторполімерів та введенням у полімерну матрицю додаткових компонентів (наповнювачів), які значно покращують рівень їх властивостей.

1.3 Наповнювачі, модифікатори для полімерів триботехнічного призначення

У сучасності існують декілька десятків тисяч різноманітних полімерних матеріалів. В залежності від їх природи (органічні, не органічні), фізичної (аморфні, кристалічні) та хімічної (лінійні, розгалуженні тощо) структури тощо полімери мають досить широкий спектр властивостей. Деякі з них мають мінімальні значення густини від 0,8 г/см³ [72], деякі витримують навантаження до 250 МПа [73], інші можуть працювати при температурах більше 300оС [74,75], відносно подовження деяких при навантаженнях може сягати десятків та сотен міліметрів [76].

Зважаючи на такі широкі спектри властивостей деталі із полімерів використовуються практично у всіх машинах і механізмах, які працюють як на Землі так і у космосі. Однак зважаючи на те, що “ідеалізованого” полімерного матеріалу не існує (тобто немає полімеру із одночасно максимальним рівнем фізико-механічних, теплофізичних та інших властивостей) виникає потреба у покращенні рівня визначених (потрібних для відомих цілей) властивостей. Це можна зробити за допомогою використання різноманітних за природою, морфологією та структурою наповнювачів, модифікаторів тощо [77].

У більшості випадків для покращення трибологічних властивостей полімерів використовуються саме наповнювачі, які уявляють собою дрібнодисперсні матеріали, сферичної чи шаруватої структури. [78].

Наповнювачі для матеріалів антифрикційного призначення повинні не тільки позитивно впливати на тертя та зношування виробів із них, але і сприяти покращенню рівня інших експлуатаційних характеристик виробів (міцність,

жорсткість, теплостійкість), а також для надання їм різних специфічних властивостей та зниження вартості. Наповнювачі відіграють ключову роль у формуванні основних характеристик полімерних композиційних матеріалів, і від їх якості значною мірою залежать технологічні властивості та можливості переробки композитів у виріб. Ідеальний наповнювач повинен відповідати ряду вимог, які часто є протиріччями між собою: висока міцність, фізико-механічні властивості, низьке водопоглинання, хороша змочуваність, відсутність шкідливих домішок, низька вартість, висока хімічна стійкість та термостійкість, негорючість, доступність переказу заданої форми та розмірів частинок, а також хороша диспергуваність [79]. Крім того, наповнювачі повинні гармонійно взаємодіяти з полімером або диспергуватися в ньому, щоб створювати однорідну композицію, і не змінювати свої властивості під час зберігання, переробки та експлуатації [80].

Підходи до класифікації наповнювачів можуть бути різними, але усі вони мають на меті систематизацію цих матеріалів за різними характеристиками. Наразі всі відомі наповнювачі поділяються за їхнім агрегатним станом на газоподібні, рідкі та тверді. За своєю природою вони можуть бути органічними або неорганічними; за джерелом отримання – рослинними, синтетичними або мінеральними; за призначенням – армуючими, зміцнюючими, підсилюючими або нейтральними. Щодо розмірів, форми частинок та їх структури, існують чотири основні види наповнювачів: дисперсні (порошкоподібні), волокнисті (волокна, нитки, джгути і т.д.), листові (плівкові) з певною структурою (тканини, папір, стрічки, плівки, сітки) та об'ємні (каркасні) з безперервною тривимірною структурою (об'ємні тканини, повсть, скелетні та пористі каркаси). Остання класифікація, яка враховує розміри та структуру частинок, вважається найбільш раціональною.

Найбільш широке розмаїття властивостей можна отримати, використовуючи тверді наповнювачі різної природи, такі як метали, кераміка та полімери, з різною структурою. Практично будь-які існуючі природні та штучно створені матеріали можуть бути використані як наповнювачі для створення полімерних композитних матеріалів, після надання їм потрібної форми, структури та розмірів. З одного й того ж матеріалу, наприклад, скла, можна отримати різноманітні наповнювачі за

формою, розмірами та структурою: порошки з частинками кулястої, лускатої, голчастої або еліпсоїдної форми; нитки, волокна різного діаметра та довжини; тканини, стрічки, полотна і т.д.[81,82].

Класифікація наповнювачів за І. Гасманом приведена на рисунку 2.

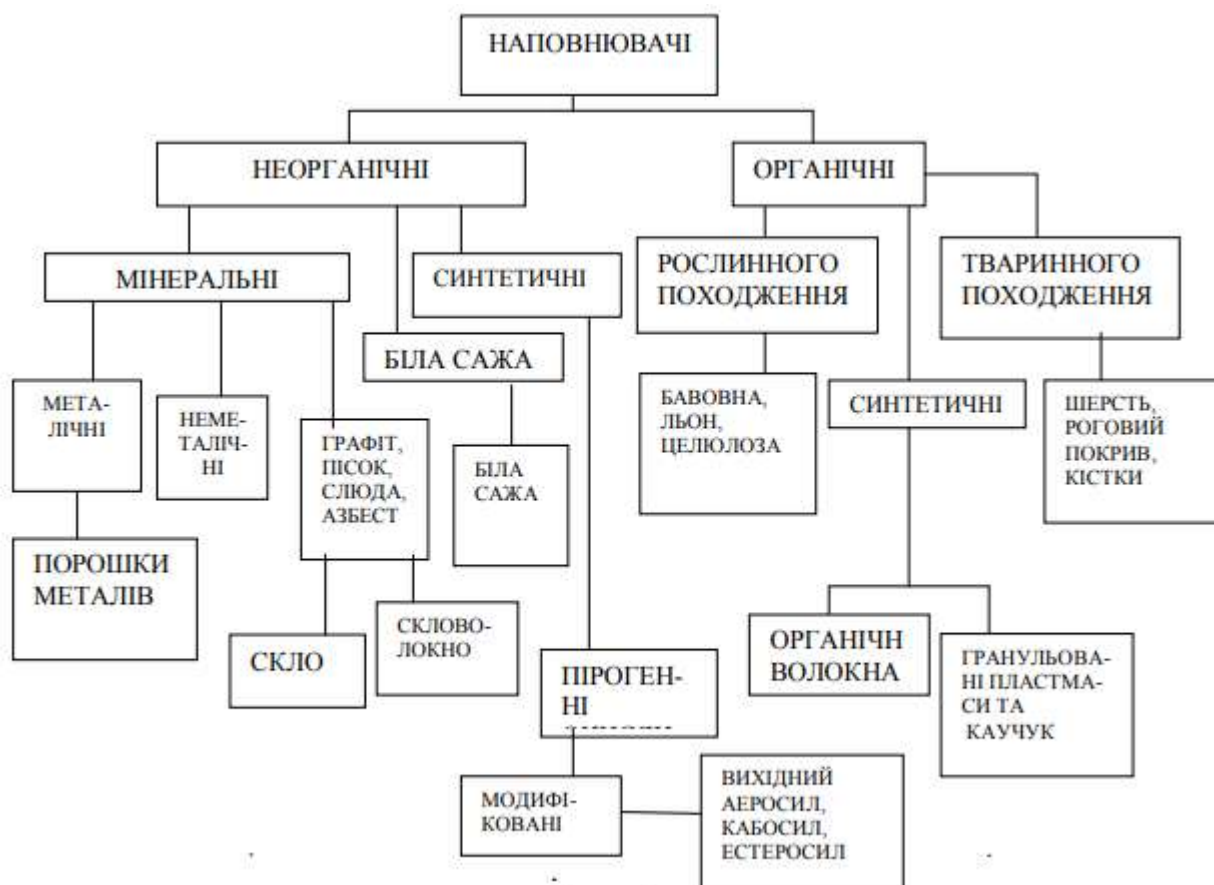


Рисунок 2 - Класифікація наповнювачів за походженням, запропонована І. Гасманом [83].

Класифікація наповнювачів за будовою частинок приведена на рисунку Рис. 3.

Наповнювачі можуть вводитися в полімер окремо, або у різноманітних пропорціях, в залежності від призначення композиційних матеріалів.

Наповнювачі відіграють суттєву роль у формуванні основних фізико-механічних властивостей композитів. Їх введення у полімери призводить до зменшення сегментної рухомості макромолекул полімерів при дії на них

навантаження, що сприяє збільшенню міцності, твердості та модуля пружності матеріалу [84]. Також наповнювачі, введені у полімер, є перепорою до швидкого розповсюдження внутрішніх тріщин при руйнуванні полімерних композитів при дії навантаження, що також сприяє покращенню їх фізико-механічних властивостей [85].

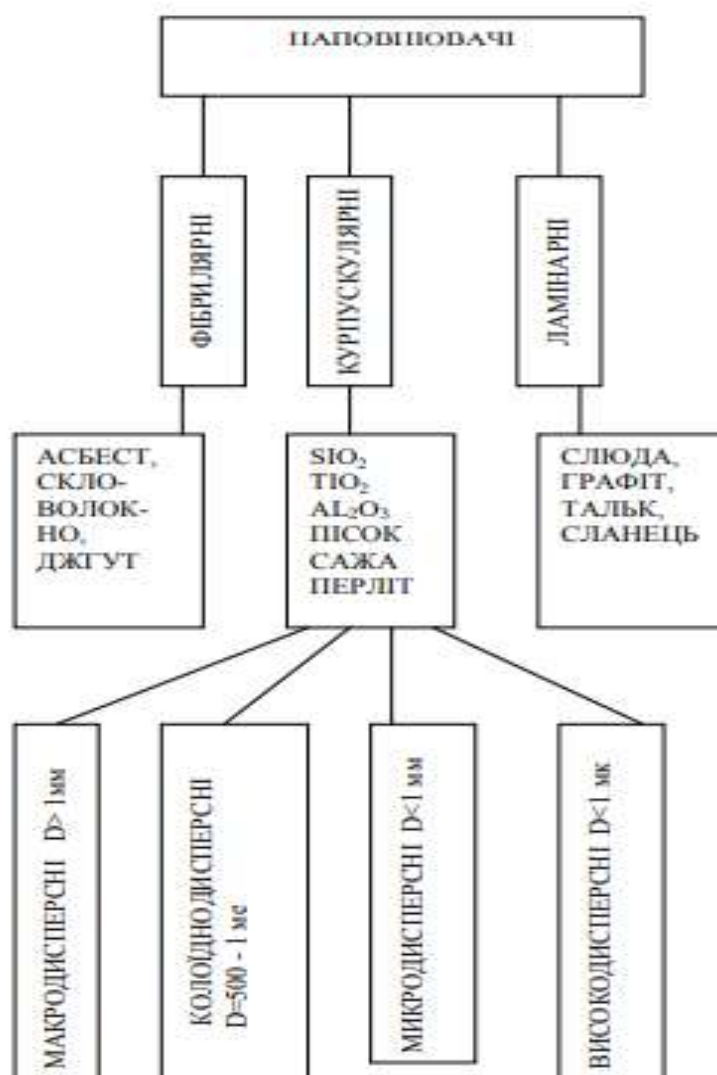


Рисунок 3 - Класифікація наповнювачів за будовою частинок [83]

Так для покращення рівня міцності, модуля пружності та твердості у полімери вводять наповнювачі, які здатні до фізичної чи хімічної взаємодії із полімерною матрицею. Так досить часто для цього використовують фібрилярні (волокнисті) наповнювачі, які можуть створювати, як міцний армуючий каркас (у більшості

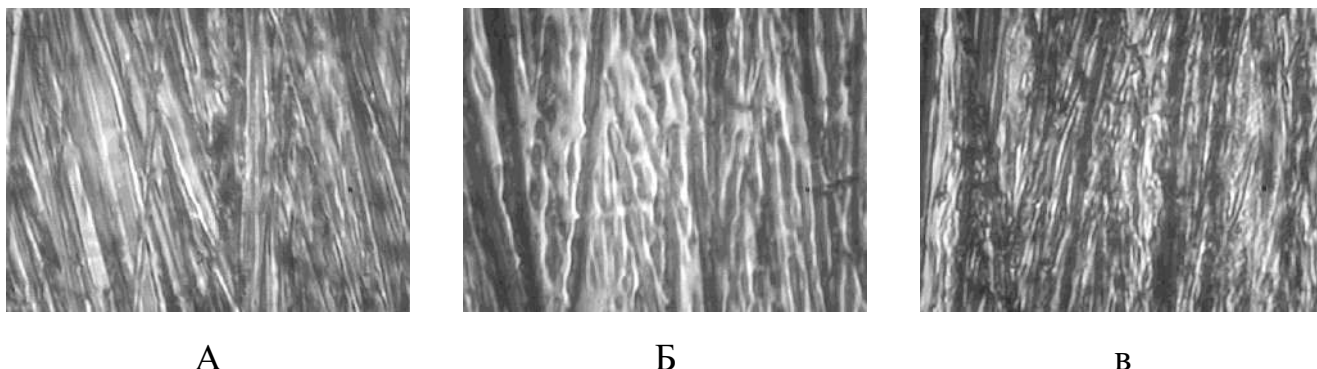
випадків це композити на основі реактопластичних полімерів), так і рівномірно розподілятися по всьому об'єму полімерної матриці (у більшості випадків це характерно для термопластичних полімерів). До фібрилярних наповнювачів відносяться органічні та неорганічні волокна, азбест тощо [86]. Корпускулярні (дисперсні) наповнювачі також досить широко застосовуються в якості елементів, які зміцнюють полімерну матрицю. Однак їх вплив на міцність полімерної матриці менш виражений у порівнянні із фібрилярними. Однак слід відмітити, що композити, наповнені корпускулярними наповнювачами є значно більш технологічними у переробці ніж фібрилярними, що впливає на рівень їх вартості і робить більш привабливими до використання. До найбільш розповсюджених корпускулярних наповнювачів слід віднести деякі метали та їх з'єднання, вуглецеві та кремній вмісні матеріали [87,88].

Досить часто для покращення фізико-механічних властивостей полімерів використовуються апрети [89]. Це матеріали, які наносять на поверхню наповнювачів(у більшості випадків фібрилярних) для їх кращої взаємодії із молекулами полімерної матриці, що впливає на покращення рівня фізико-механічних властивостей отриманих полімерних композиційних матеріалів.

Теплофізичні властивості полімерів також можна регулювати, використовуючи різні за природою, структурою та морфологією наповнювачі. У більшості випадків для цього використовують дрібнодисперсні матеріали, які здатні до взаємодії із молекулами полімеру, обмежуючи при цьому їх рухомість, яка значно збільшується при нагріванні. Це покращує рівень термічної та теплостійкості полімерних композитів, зменшуючи при цьому їх температурне розширення [90].

Трибологічні властивості полімерів досить часто покращують введенням у їх склад ламілярних наповнювачів, таких, як графіт, тальк, слюда, дисульфід молібдену, нітрид бору тощо [91]. Такі наповнювачі оказують позитивний вплив на процес тертя та зношування полімерних композитів при фрикційній взаємодії із сталлю. Що відбувається за рахунок розшаровування ламілярних матеріалів під дією великих зсувних зусиль, що виникають при терті, та перенесення їх на поверхню сталевого зразка. У результаті чого на останньому створюються островки

перенесення, які об'єднуються у антифрикційне покриття, що складається із частинок ламілярного наповнювача та полімеру (рисунок 4), які сприяють зміні характеру тертя полімерного композиту із сталлю.



А

Б

В

Рисунок 4 – Поверхня металевго зразка (а) до та (б) після фрикційної взаємодії із вихідним (б) та наповненням (б)

У композити, які працюють при змащуванні досить часто в якості антифрикційних добавок додають дрібнодисперсні метали чи їх сплави. З поміж таких широке розповсюдження отримали композити, наповнені мідь- та срібловмісними матеріалами [92], які при визначених зовнішніх умовах тертя здатні до вибіркового перенесення на сталеву поверхню із створенням металевго покриття, яке сприяє зменшенню тертя та зношування у парі тертя полімерний композит-сталь [93].

Більшість наповнювачів, які використовуються для створення матеріалів для вузлів тертя досить значно покращують їх тертя та зносостійкість при фрикційній взаємодії із сталлю, однак значно зменшують рівень фізико-механічних властивостей у порівнянні із вихідними полімерами [94,95].

Що обмежує широке застосування цих матеріалів у вузлах тертя, які працюють в при високому рівні навантажень та знакоперемінних навантажень тощо. Тому зважаючи на попередні роботи [96,97] у якості наповнювача для полімерів трибологічного призначення нами був обраний діоксид кремнію. Він при введенні у полімери покращує їх трибологічні властивості при терті по сталі на рівні деяких шаруватих наповнювачів [98]. Також завдяки добре розвиненій поверхні (до

380м²/г) із активним силанольними групами на ній [99], діоксид кремнію здатен до фізичної та хімічної взаємодії із полімерами, позитивно впливаючи на рівень їх фізико-механічних властивостей.

Слід відмітити, що для створення матеріалів трибо логічного призначення можна використовувати тільки діоксид кремнію із розмірами частинок до 20 мкм, що обумовлено їх безпосереднім впливом на сталеву поверхню тертя. Проведені дослідження вказують на те, що частинки із розмірами більше 20 мкм сприяють значному абразивному зношуванню сталевій поверхні при терті [100]. Отримати частинки діоксиду кремнію із розмірами частинок не більше 20 мкм у полімерній матриці досить складно, тому що вони завдяки активній поверхні агрегуються створюючи при цьому мікроефекти у тілі полімерних композитів. При цьому також не вдається отримати полімерні композити із високою якістю розподілення наповнювача у об'ємі полімеру.

Для руйнування агрегатів наповнювача та рівномірного його розподілення у об'ємі полімерної матриці необхідно підібрати найбільш ефективну методику переробки полімерного композиту у вироби, завдяки якій вдасться отримати матеріали із діоксином кремнію з розмірами до 20 мкм, які мають найвищим ступенем розподілення наповнювача у полімерній матриці.

1.4 Методи переробки полімерів та композитів на їх основі у вироби

У загальному випадку технології переробки полімерів у вироби поділяються на 3 основні етапи [101]:

- підготовчий;
- основний;
- заключний.

На підготовчому етапі відбуваються операції приготування та підготовки вихідного полімеру чи полімерної композиції для подальшої переробки.

Спочатку на підготовчому етапі відбувається операції, які готують вихідні полімери та наповнювачі до змішування. Це операції подрібнення, просіювання, сушки тощо. В подальшому відбувається їх зважування у заздалегідь визначених пропорціях. Після операції зважування відбуваються операції змішування вихідних компонентів полімерних композицій. Причому для більшості полімерів використовується змішування за допомогою операції екструдювання [102]. Тобто заздалегідь підготовлені вихідні компоненти завантажуються у екструдери, де за допомогою температурної дії та високого рівня здвигових зусиль відбувається інтенсивне перемішування вихідних компонентів полімерної композицій (рисунок 5).

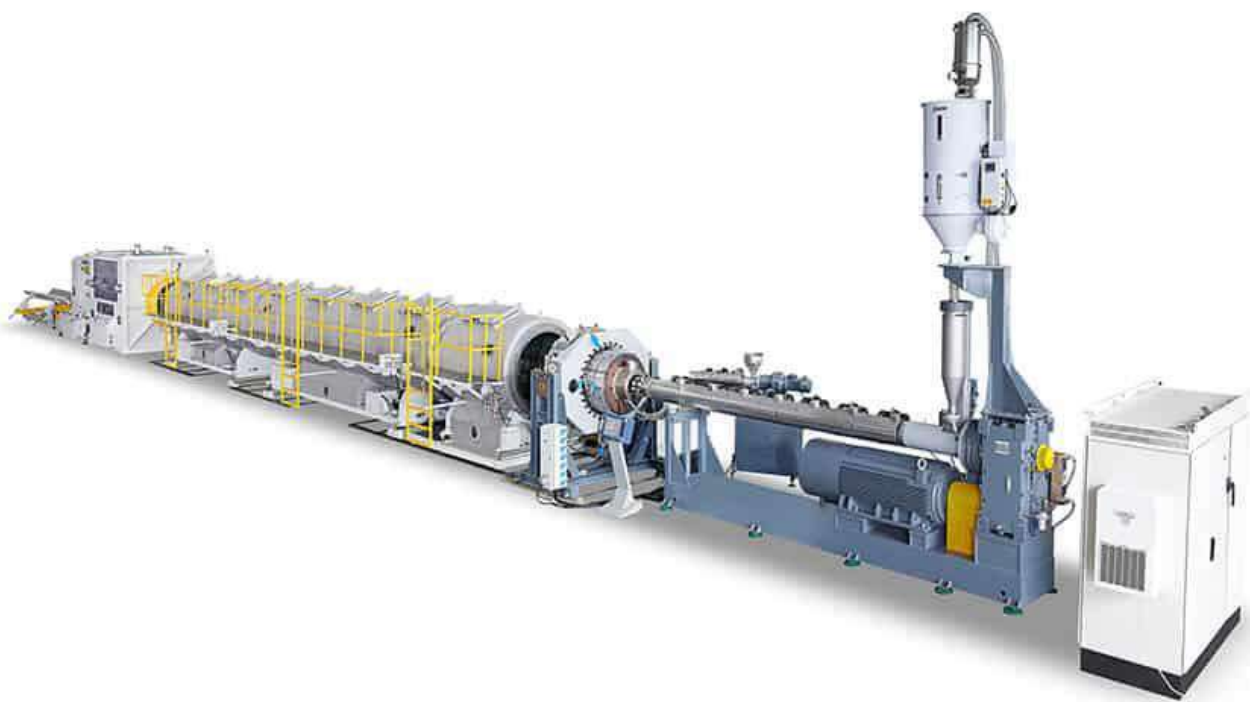


Рисунок 5 – Екструзійна лінія

Розплавлена суміш виходить із формуючої головки екструдера, охолоджується та подрібнюється на гранули для подальшої переробки.

Ще одним способом змішування полімерів є перемішування на мішалках спеціальної конструкції [103]. Цей спосіб використовується при необхідності

змішати дрібнодисперсні полімери із твердими дрібнодисперсними наповнювачами. Один із варіантів таких змішувачів приведено на 6.



Рисунок 6 – Змішувач типу “п’яна бочка”

Також для змішування таких вихідних інгредієнтів можуть бути використані швидкохідні мішалки із складною формою лопатей.

Змішана композиція для покращення технологічності процесу переробки йде на брикетування [104]. Ця операція відбувається за допомогою спеціальних прес форм, формуюча поверхня яких повністю чи частково відповідає розмірам майбутнього виробу (Рисунок 7).



Рисунок 7 – Форми для отримання брикетів

На основному етапі переробки відбувається отримання із гранул чи брикетів готових виробів. Для цього використовують: лиття під тиском, пресування у формах із підігрівом чи спікання.

Литтям під тиском переробляються полімери та композити на їх основі, розплав яких мають текучість у межах 2...20 г/10 хв. Для цього використовуються спеціальне обладнання, яке називається литтєві машини [105,106]. До найбільш розповсюджених литтєвих машин слід віднести шприц-машини та термопластавтомати (рисунок 8).

Їх робота полягає у розплавленні гранул полімерів чи композитів за допомогою теплової (електричний обігрів) та механічної (шнек) дії. Після цього

розтоп під тиском впорскується у литтєву форму, де він охолоджується (для термопластів) чи підігрівається (для реактопластичних полімерів).



А



Б

Рисунок 8 – Литтєві машини для переробки полімерів та композитів на їх основі у виробі: а – шприц-машина; б – термопластавтомат.

Полімери та композити, розплави яких мають текучість більше 20г/10 хв, у більшості випадків, переробляються методом пресування у формах із підігрівом чи спіканням [107]. Пресування відбувається у спеціальних формах із підігрівом за допомогою пресового обладнання (рисунок 9).



А



Б

Рисунок 9 – Пресове обладнання (а) рамного та (б) колонного типів

Для підігріву прес-форм використовують спеціальні плити із омичним підігрівом чи з використанням інших теплоносіїв. Форми для пресування, у більшості випадків підігріваються за допомогою омичного обігріву (рисунок 10).



Рисунок 10 – Прес-форма із обігрівом для отримання

Спикання полімерів та композитів на їх основі відбувається у термічних шафах із регульованим підігрівом. Для цього використовують вже сформовані попередньо брикети.

Заключний етап переробки полімерів та композитів на їх основі у виробі полягає у механічній обробці для надання їм визначеного проектною документацією (креслення, специфікації тощо) вигляду. Для цього використовується наступне механічне обладнання [108,109]: токарні, фрезерні, свердлильні верстати тощо. На рисунку 11 показані приклади такого обладнання.

У сучасному машинобудуванні для механічної обробки та виготовленню деталей із полімерів та композитів також використовують механообробні центри із числовим програмним керуванням. Вони дозволяють обробляти заготовки і отримувати деталі досить високого рівня складності за короткий період часу з однієї установки.

Відповідно до вище наданої інформації для подальших досліджень нами було обрано фторполімери (політетрафторетилен, кополімер тетрафторетилена з етиленом та полівініліденфторид). У відному вигляді ці полімери являють собою дрібнодисперсні порошки. Тому їх суміщення можна проводити на швидкохідних мішалках. Що дозволяє отримувати полімерну композицію із досить високою якістю розподілення наповнювача у полімері.

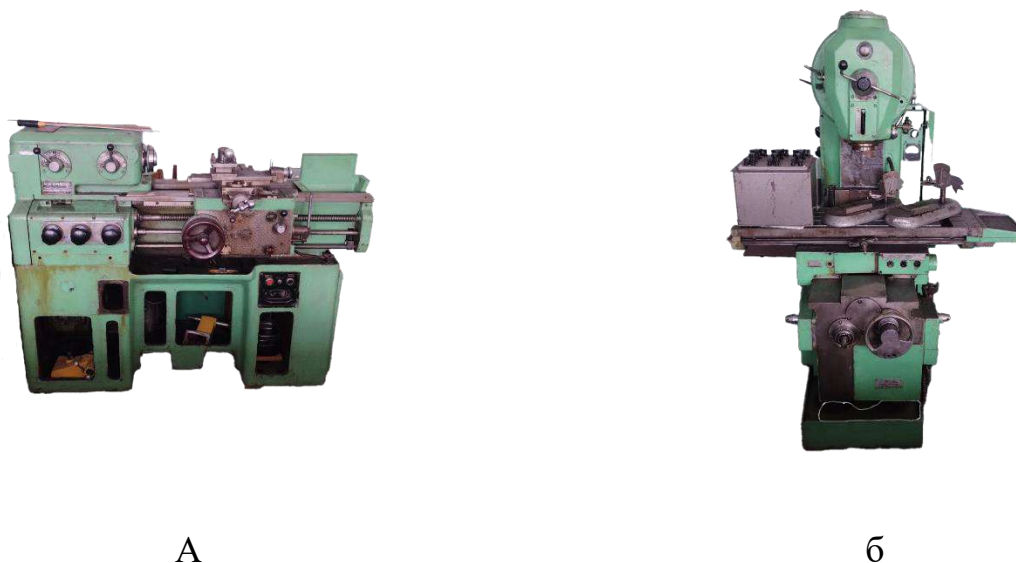


Рисунок 11 – Обладнання для механічної обробки виробів із полімерів: а – токарний верстат; б – свердлильно-фрезерний верстат

Із обраних фторполімерів політетрафторетилен переробляється у вироби за допомогою спікання та пресування у формах із підігрівом. Це обумовлено досить жорсткими молекулами, які при нагріванні не забезпечують необхідний рівень в'язкості для переробки такого полімеру високопродуктивним методом литьям під тиском. Кополімер тетрафторетилена з етиленом та полівініліденфторид можна переробляти як литтям під тиском так і пресуванням у формах із підігрівом. Зважаючи на те, що порівняння властивостей розроблених матеріалів можна робити тільки при їх однаковому методу переробки було прийнято рішення переробляти розроблені фторполімери та композити на їх основі методом пресування у формах із підігрівом.

Механічна обробка зразків із розроблених композитів на основі фторполімерів проводилася за допомогою модернізованого металорізального верстату 16K20.

РОЗДІЛ 2

ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Об'єкти досліджень

Для полімерних матриць ПКМ які застосовуються у вузлах тертя та герметизації були обрані наступні фторполімери: Політетрафторетилен, Кополімер тетрафторетилену з етиленом та полівініліденфторид. В якості наповнювача було обрано діоксид кремнію. Структурні формули наведених фторполімерів приведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – структурні формули фторполімерів

№	Назва матеріалу	Структурна формула
1	Політетрафторетилен	$\left[\begin{array}{cc} \text{F} & \text{F} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{F} & \text{F} \end{array} \right]_n$
2	Кополімер тетрафторетилену з етиленом	$\left[\begin{array}{cccc} \text{F} & \text{F} & \text{H} & \text{H} \\ & & & \\ -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C}- \\ & & & \\ \text{F} & \text{F} & \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_n$
3	Полівініліденфторид	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{F} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{F} \end{array} \right]_n$

Політетрафторетилен є кристалічним полімером, температура плавлення його кристалів +327°C. Згідно дослідів Буна та Ховелса, Кларка та інш., має три структури, які змінюються під дією температури. При плавленні

політетрафторетилена його питома вага зменшується, а подальша термообробка сприяє збільшенню кристалічності полімера. Густина змінюється від степені кристалічності від $2,15 \text{ г/см}^3$ до $2,28 \text{ г/см}^3$. Політетрафторетилен у машинах при температурі до 300°C , а мінімальна температура експлуатації згідно Свенсона може досягати температури рідкого гелію -270°C . У вихідному вигляді політетрафторетиєня являє собою пухкий, легкокомкуючий та волокнистий порошок білого кольору [1] із розміром части чек до 100 мкм .

Кополімер тетрафторетилену з етиленом - фторовмісний полімер марки Tefzel виробництва DuPont, США. Має кристалічну структура. В залежності від умов термообробки може кристалізуватися у ромбічну або гексагональну структуру. Ромбічна структура утворюється при кристалізації розплаву, а потім переходить в гексагональну форму при нагріванні кополімера нижче температури плавлення. У процесі кополімерізації утворюються кристаліди з гексагональною формою зв'язків. Відрізняється високими міцністю, твердістю та стійкістю до радіаційних випромінювань.

Полівінілденфторид - фторовмісний полімер марки KF виробництва Kureha, Японія. Полімеризується під тиском при температурі 100°C у присутності перекису діацетила. Температура плавлення 171°C , температура деструкції 343°C .

Полівініліденфторид відзначається значною міцністю, що пояснюється його високим рівнем кристалічності. Зокрема, його руйнівна напруга при розтягуванні досягає $49,2 \text{ МПа}$, а відносне подовження при розриві становить 300% . Межа міцності при стисканні цього полімеру сягає $70,3 \text{ МПа}$.

Полівініліденфторид також демонструє високу хімічну стійкість. Він не піддається впливу мінеральних кислот, лугів, галоїдів і вуглеводнів. Полімер частково розчиняється в ацетоні, а добре розчиняється в толуолі, хлороформі та диметилацетаміді. У вихідному вигляді являє собою розсипчастий білий порошок з насипною масою $0,48 \text{ г/см}^3$.

Порошкоподібний наповнювач силікагель переважно складається з діоксиду кремнію (SiO_2) з вмістом близько $99,95\%$, при цьому можуть міститися домішки оксидів алюмінію (Al_2O_3), заліза (Fe_2O_3), кальцію (CaO), магнію (MgO) та натрію

(Na_2O). Силкагель характеризується винятковою хімічною стійкістю до дії концентрованих мінеральних кислот навіть при підвищених температурах. Винятками є лише фтороводнева та фосфорна кислоти. Схематичне зображення структури діоксиду кремнію приведено на рисунку 12.

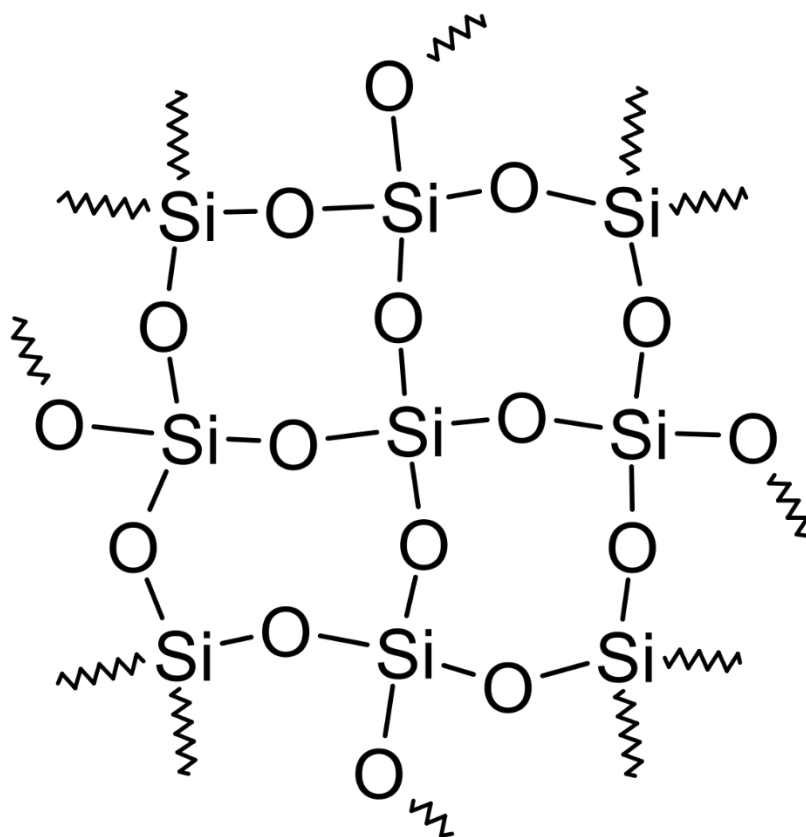


Рисунок 12 – Структурна формула діоксиду кремнію

2.2 Методи досліджень

Гранулометричний аналіз розмірів вихідних частинок фторполімерів проводили згідно із стандартом ISO 13322-1(2):2021. Для отримання фото частинок використовували оптичний мікроскоп Carl Zeiss Jena Ergaval (рисунок 13), який обладнано цифровим окуляром SCOPETEK DEM-130 (1.3MP).



Рисунок 13 –Оптичний мікроскоп Carl Zeiss Jena Ergaval

Фото брикетів із фторполімерів отримували за допомогою фотокамери Canon DS126271.

Густина полімерів визначено за ISO 1183 за допомогою методу гідростатичного зважування на аналітичних вагах ВЛР– 200 (рисунок 14), з модулем для гідростатичного зважування.



Рисунок 14 – Ваги ВЛР-200

Брикети отримували у формах для брикетування із діаметром формуючої порожнини 10 мм на гідравлічному пресі із зусиллям пресування 5 т.

Термомеханічний аналіз досліджуваних полімерів проведено відповідно до ISO-11359 на приладі VEB Rauenstein FWV (рисунок 15). Об'єктом досліджень були циліндричні зразки з розмірами: діаметр $10 \pm 0,2$ мм, висота $10 \pm 0,2$ мм.



Рисунок 15 – VEB Rauenstein FWV

Стійкість до дії температури об'єктів дослідження виміряно за допомогою методу термогравіметричного аналізу, відповідно до ISO-11358, методами сканування за температурою і часом на дериватографі TGA Q50 (рисунок 16).



Рисунок 16 – Дериватограф TGA Q50

Напруження при межі текучості (σ_y) при стисканні досліджуваних полімерів визначали за ISO 604 на універсальній розривній машині 2167 P-50 (рисунок 17).



Рисунок 17 – Розривна машина 2167 P-50

Рентгеноструктурний аналіз полімерів проведено на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2 у монохроматизованому $\text{Cu-K}\alpha$ 93 випромінюванні. Об'єктом досліджень були циліндричні зразки з розмірами: діаметр $15 \pm 0,2$ мм, висота $10 \pm 0,2$ мм.

Трибологічні дослідження проводили на машині тертя СМЦ-2 за схемою диск-колодочка у режимі тертя без змащування при навантаженні $P = 0,75$ МПа та швидкості ковзання $0,75$ м/с. При цьому використовували сталеве контртіло із сталі 45 з твердістю 45-50 HRC та шорсткістю поверхні тертя $0,32$ мкм. Коефіцієнт тертя визначали за допомогою модернізованого вузла вимірювання моменту тертя. Модернізація полягає у виведенні показників моменту тертя на комп'ютер завдяки прецензійному мультиметру UNIT UT8804E. Інтенсивність лінійного зношування при фрикційній взаємодії досліджених матеріалів із сталлю визначали за допомогою вагового методу на прицензійних вагах ВЛР-200 із подальшим переведенням у досліджувану величину. Температуру на поверхні тертя визначали за допомогою хром ель-алюмелевої термопари із вимірювальним приладом MASTECHMS6514.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ПЕРЕРОБКИ ФТОРПОЛІМЕРІВ У ВИРОБИ

Сучасне машинобудування не може інтенсивно розвиватися без використання нових матеріалів із кращим рівнем властивостей замість існуючих аналогів [110, 111]. Одними із таких матеріалів є полімери та композити на їх основі. Вони вирізняються високим рівнем стійкості до агресивних середовищ, достатнім рівнем міцнісних властивостей (до 240 МПа) при мінімальних значеннях густини (0,8-2,2 кг/м³), можливістю роботи у вузлах тертя без та із змащуванням тощо [112].

Одними із найбільш розповсюджених груп полімерів є фторполімери. Вони відрізняються найкращою стійкістю до дії агресивних середовищ серед усіх полімерів (набухають та розчиняються тільки при дії деяких органічних розчинників, суміші концентрованих азотної і соляних кислот тощо), високим рівнем термічної стійкості (до 450°C), невеликими значеннями коефіцієнту тертя (до 0,2) при фрикційній взаємодії із сталлю та одною із найкращих зносостійкостей (до 100×10^{-9} м/м) із відомих полімерів [29].

Однак фторполімери мають досить невисокий рівень фізико-механічних властивостей (10-60 МПа), що обмежує їх ще більш широке використання у сучасних машинах і механізмах [30,31]. Тому актуальним є покращення їх фізико-механічних властивостей при збереженні високого рівня теплофізичних та трибологічних.

Одним із основних методів покращення рівня властивостей полімерних матеріалів є додавання у їх склад різних за природою, структурою та морфологією наповнювачів та модифікаторів. Вони вступають у фізичну чи хімічну взаємодію із полімером і виконують роль армуючих компонентів отриманої композиції.

Відповідно до інформації приведеної у попередньому розділі найбільш підходящими наповнювачами для фторполімерів є діоксиди кремнію.

Більшість кремнійвмісних наповнювачів представлені у вигляді діоксиду кремнію різних модифікацій, із притаманною їм структурою та морфологією. Вони

відрізняються досить розвиненою поверхнею (рисунок 18) на якій знаходиться велика кількість активних силанольних груп (SiOH), здатних до фізичної та хімічної взаємодії із полімером (рисунок 19).

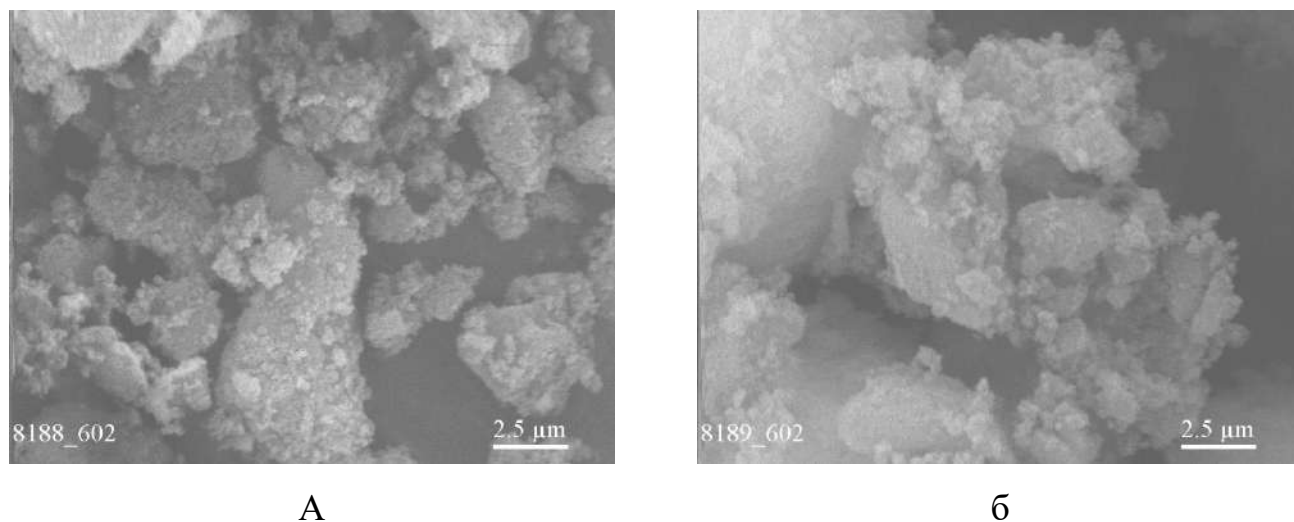


Рисунок 18 – Мікрометричні знімки частинок діоксиду кремнію

У роботі Токаря А. та Кабата О. [113] теоретично (за допомогою квантово-хімічних розрахунків на рівні *ab initio* теорії) та експериментально (за допомогою ІК-спектроскопії) доведено взаємодію силанольних груп діоксиду кремнію із амідним у ароматичних та аліфатичних поліамідах.

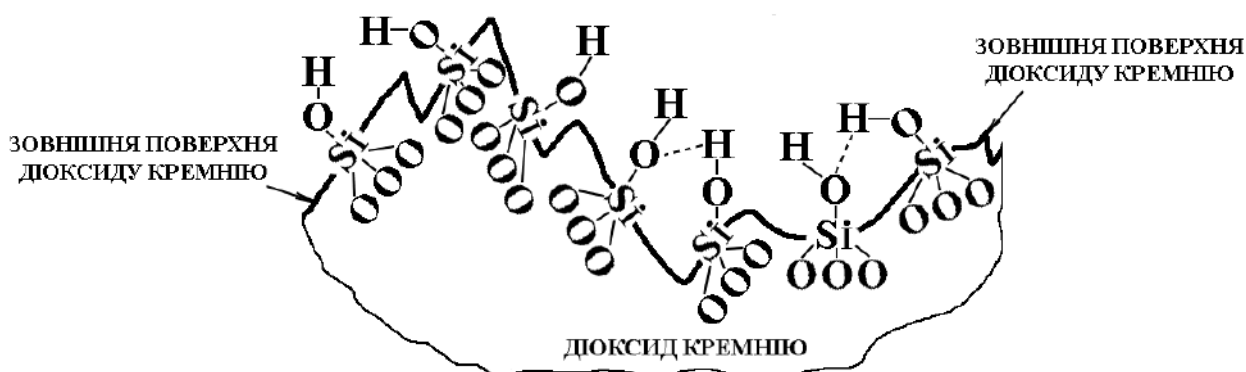


Рисунок 19 – Схематичне зображення силанольних груп на поверхні діоксиду кремнію

У роботі А. Madhan Kumar, Sanjay S. Latthe [114] доказана взаємодія силанольних груп із метакрилатними у процесі отримання композиту на основі поліметилметакрилату із діоксидом кремнію.

Зважаючи на це використання діоксиду кремнію для наповнення фторполімерів є досить актуальним.

Фторполімери переробляються у виробі наступними методами [31] (рисунок 20).

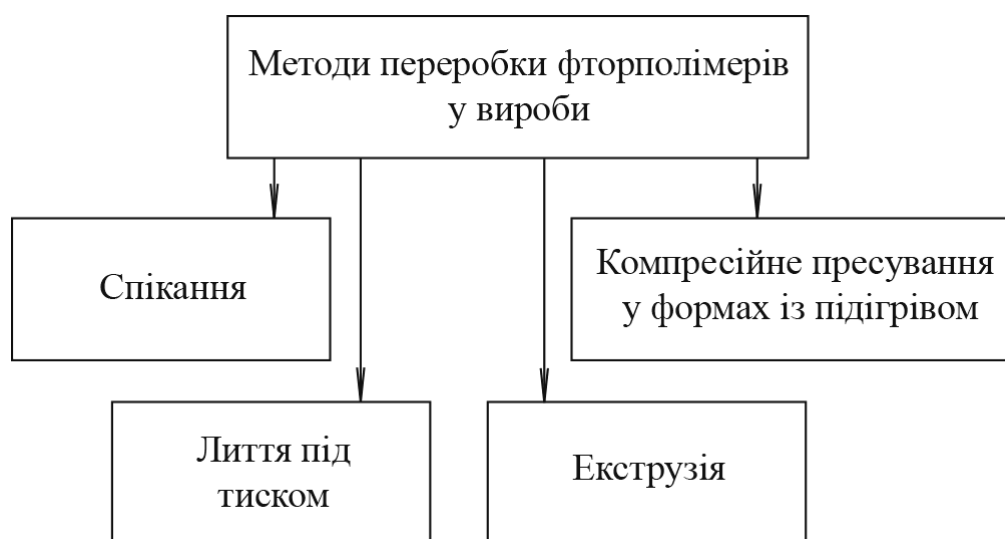


Рисунок 20 – Методи переробки фторполімерів у виробі

Високопродуктивні методи лиття під тиском та екструзія, використовуються у більшості випадків для отримання виробів із фторполімерів на масових та серійних їх виробництвах, що є оптимальним з точки зору витрат та прибутків. Однак досить висока собівартість обладнання (литтєві машини та екструдери) та оснащення (литтєві форми, екструзійні головки тощо) до них обмежує використання таких методів переробки у виробі на одиничних виробництвах, що актуалізує використання відносно низькопродуктивних методів переробки фторполімерів у виробі, а саме спікання та компресійного пресування у формах із підігрівом [29]. Тому у роботі ми використовували саме такі методи переробки.

Технологічний процес виготовлення виробів із фторполімерів за допомогою спікання та компресійного пресування у формах із підігрівом розділяється на 3 основні етапи [115, 116] (Рисунок 21):

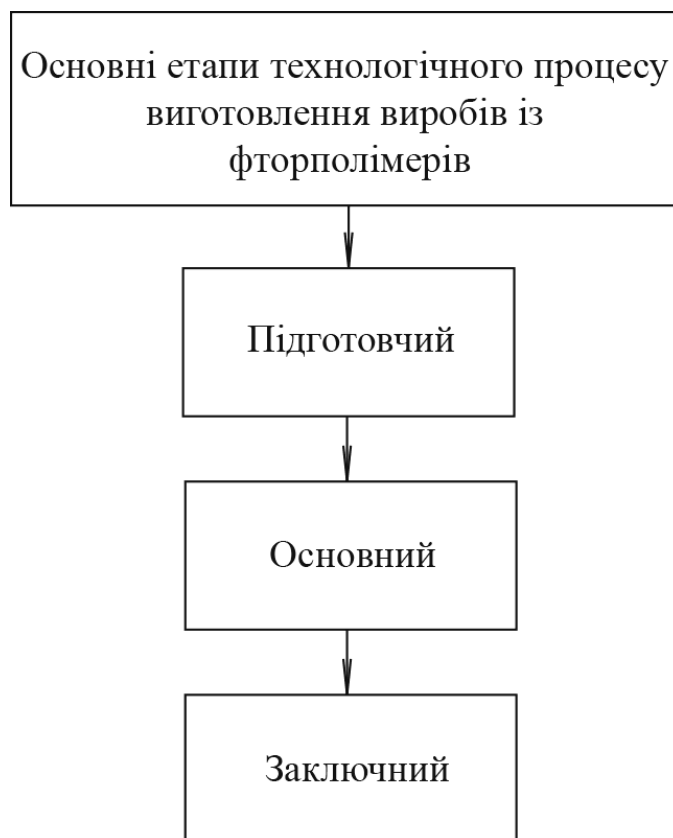


Рисунок 21 – Основні етапи технологічного процесу виготовлення виробів із фторполімерів

На підготовчому етапі відбуваються операції підготовки вихідних компонентів полімерної композиції (просіювання, сушка, подрібнення тощо), їх суміщення та брикетування. При просіюванні та подрібненні відбувається руйнування агломератів вихідних компонентів фторполімерів чи композицій на їх основі із відбором необхідної фракції полімеру, наповнювачів тощо. Суміщення відбувається за допомогою механічних та фізико-хімічних методів для отримання полімерних композицій із високою якістю розподілення вихідних компонентів. При брикетуванні відбувається отримання суцільних брикетів із фторполімерів чи полімерних композицій на їх основі для покращення технологічності при переробці їх у вироби.

На основному етапі відбувається процес безпосередньої переробки фторполімерів у вироби з високоеластичного чи в'язкотекучього стану.

Завершальний етап складається із операцій придання отриманим виробам із фторполімерів необхідної (заданої у технічній документації) геометричної форми та шорсткості (видалення ливників, механічна обробка поверхонь тощо).

3.1 Підготовчий етап переробки

Досить суттєвий внесок у якість та собівартість виробів із фторполімерів вносить підготовчий етап переробки виробів [116]. Послідовність основних операцій, які відбуваються на підготовчому етапі переробки зображена на рисунку 22.

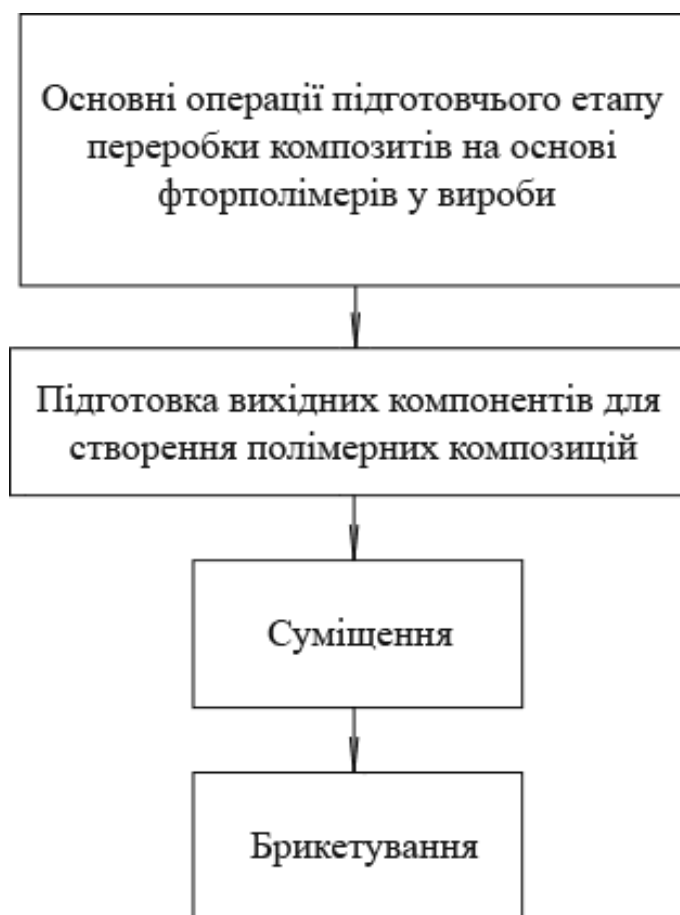


Рисунок 22 – Послідовність основних операцій, які відбуваються на підготовчому етапі переробки композитів на основі фторполімерів у вироби

Для досліджуваних фторполімерів операції підготовки вихідних компонентів полімерної композиції зводяться до їх просіювання із метою руйнування агломератів дрібнодисперсного порошку фторполімерів та відсіювання від нього зайвих включень. Для диоксиду кремнію операції підготовки зводяться до його синтезу із подальшим подрібненням.

Операція суміщення відбувається за допомогою механічних (за допомогою механічних перемішуючих пристроїв) та фізико-хімічних (полімеризаційне наповнення тощо) методів. На цьому етапі відбувається створення полімерних композицій із високою якістю розподілення вихідних компонентів. У випадку композитів на основі фторполімерів полімерні композиції являють собою дрібнодисперсні порошки із розмірами частинок до 100 мкм.

Брикетування відбувається для покращення технологічності та здешевлення процесу переробки полімерних композицій у вироби.

3.1.1 Просіювання вихідних полімерів

Відповідно до вищезазначеного операція просіювання для вихідних фторполімерів дозволяє зруйнувати агломерати, які створюються у результаті дії міжмолекулярних та електростатичних сил між їх частинками. Причому у вихідному вигляді агломерати фторполімерів за розмірами можуть сягати сотен та тисяч мікрометрів (рисунок 23).

Операція просіювання відбувається на лабораторних ситах із розміром комірки 0,1 мм. У результаті цього отримуємо дрібнодисперсні полімери, які підходять для подальшої переробки (рисунок 24).

Відповідно до мікрометричних знімків можна стверджувати, що після просіювання розміри частинок фторполімерів не перевищують 50 мкм. Для більш точного встановлення їх значень було проведено гранулометричний аналіз, відповідно до результатів мікрофотографій.

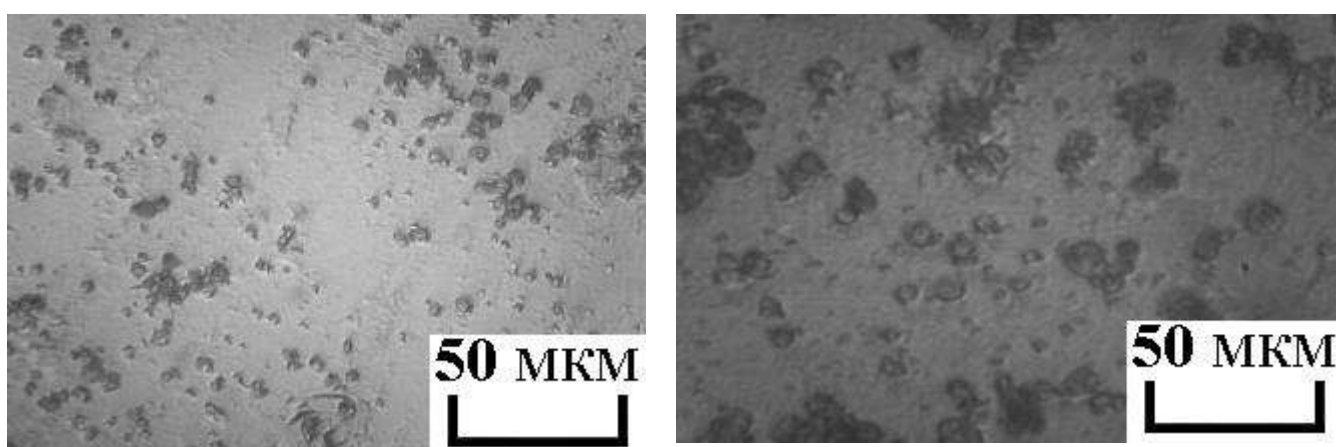


А

Б

Рисунок 23 – Мікрофотографії частинок вихідних фторполімерів: а – політетрафторетилену, б - кополімер тетрафторетилену з етиленом

Результати гранулометричного аналізу фторполімерів приведені на рисунку 25.



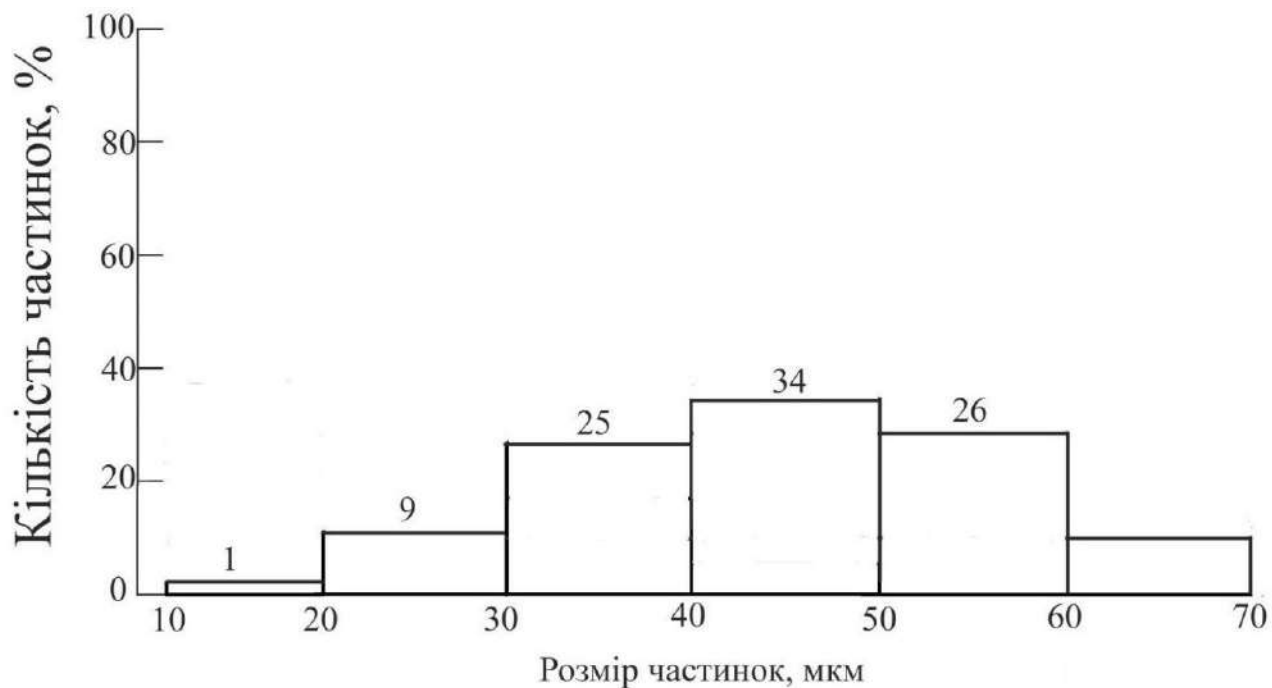
А

Б

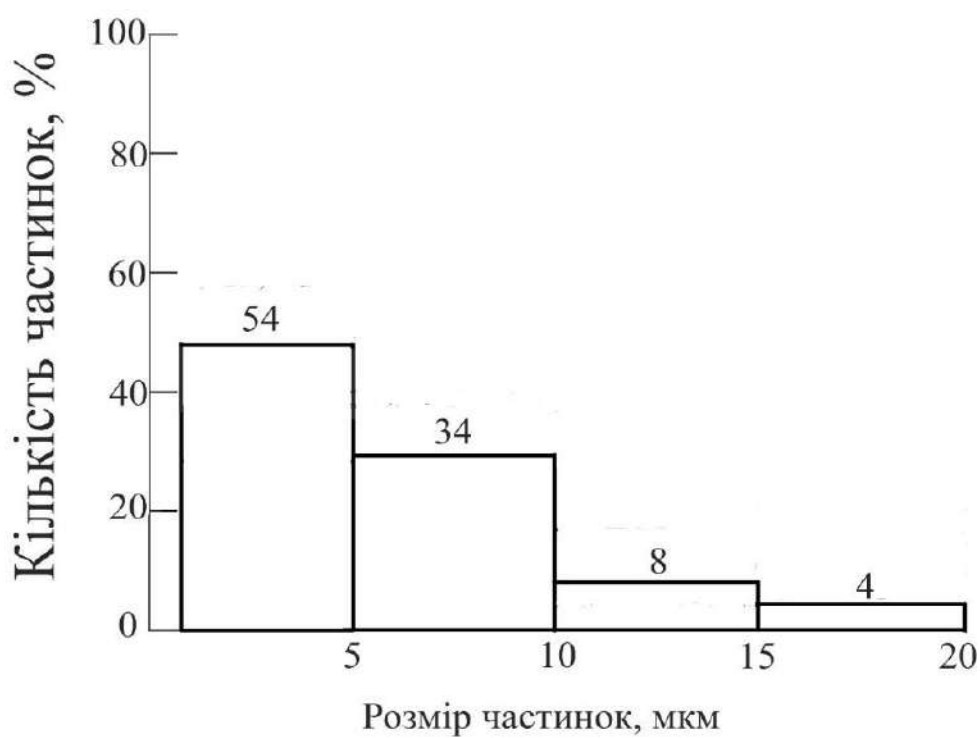
Рисунок 24 – Микрофотографії частинок фторполімерів після операції просіювання: а - кополімер тетрафторетилену з етиленом; б – полівініліденфторид

Відповідно до проведених досліджень основний розмір частинок політетрафторетилену знаходиться у межах 20-30 мкм, кополімеру тетрафторетилену з етиленом – 2 мкм та полівініліденфториду – 5-10 мкм. Такі

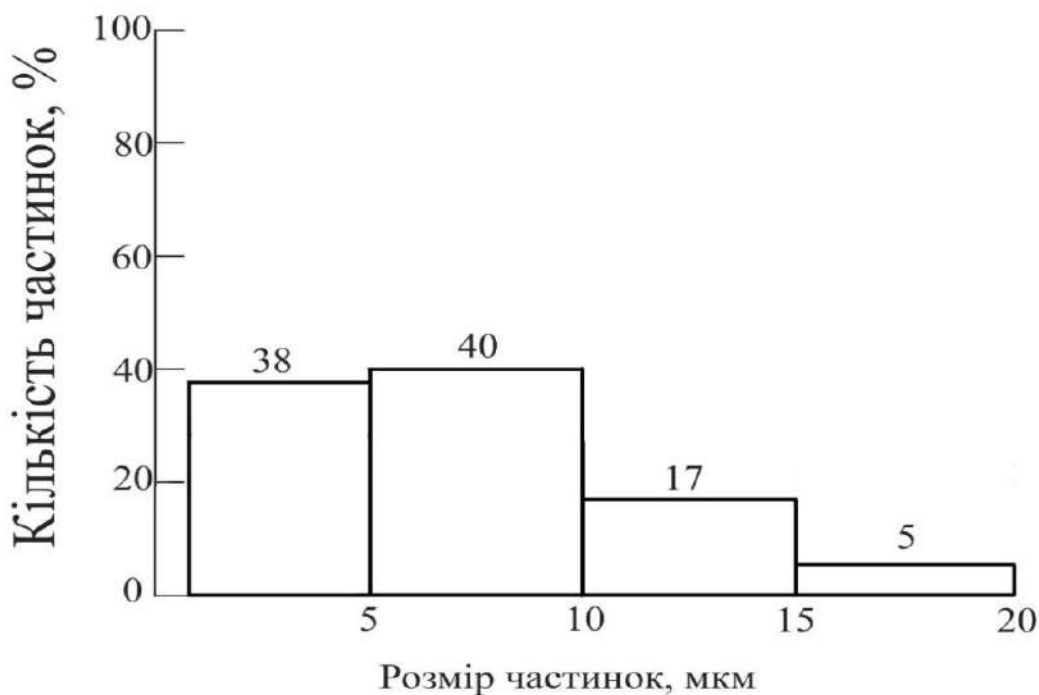
розміри частинок повністю задовольняють вимогам до полімерних основ для створення полімерних композиційних матеріалів.



а



б

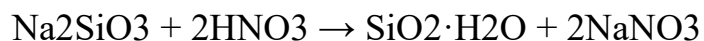


в

Рисунок 25 – Гранулометричний склад досліджуваних фторполімерів: а – політетрафторетилену; б - кополімеру тетрафторетилену з етиленом; в – полівініліденфториду

3.1.2 Синтез наповнювача

Відповідно до вищезазначеної інформації, в якості наповнювача фторполімерів було обрано диоксид кремнію. Цей матеріал отримували із гелю, який створюється у результаті реакції водного розчину метасиликату натрію із розбавленою азотною кислотою:



Методика отримання показана на рисунку 26.

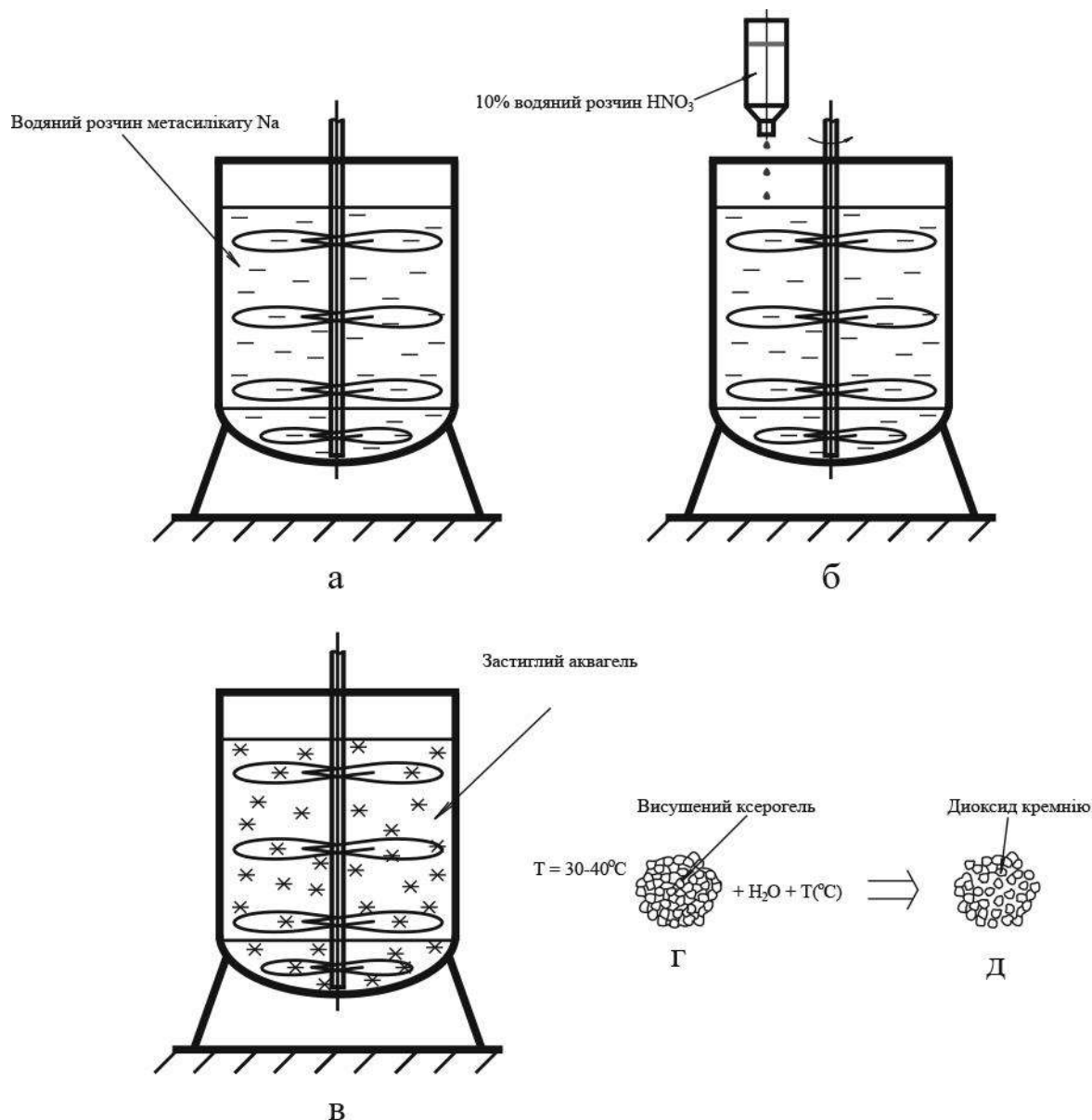


Рисунок 26 – Методика отримання диоксида кремнію: а – створення 10% водяного розчину метасилікату Na; б – підкислення водяного розчину метасилікату натрію розбавленою соляною кислотою при постійному перемішування; в – отриманий застиглий аквагель; г – висушування аквагелю із отриманням ксерогелю, його промивання; д – готовий продукт диоксид кремнію.

Відповідно до неї на початковому етапі створюють 20% водяний розчин метасилікату Na (рисунок 26, а). Далі його підкислюють 10% розчином азотної кислоти при постійному перемішуванні реакційного середовища (рисунок 26, б).

Кислоту додають крапельним шляхом із швидкістю 1 крапля у секунду, що сприяє створенню стійкого аквагелю (рисунок 26, в). При додаванні кислоти великими порціями відбувається створення золю діоксиду кремнію із його випадінням у осад [99]. Отриманий аквагель піддається сушці при температурі 30-40°C до моменту його повного зневоднення. Що визначається по припиненню врати ваги при дії температурного поля на аквагель. Отриманий висушений аквагель переходить у ксерогель, який складається із твердих частинок діоксиду кремнію, нітриту натрію та кислотних залишків (рисунок 26, г). Отриманий ксерогель відмивається від побічних продуктів (сіль та кислотні залишки) за допомогою дистильованої води. Відмивання проводили декілька разів, повноту промивання від солей та кислотних залишків визначали якісно за допомогою реактива Грісса. Отриманий продукт є діоксидом кремнію, який подрібнюється і використовується в якості наповнювача фторполімерів.

Подрібнення отриманого діоксиду кремнію відбувається на лопатевій швидкохідній мішалці із швидкістю обертання валу 1200 об/хв. (рисунок 27).

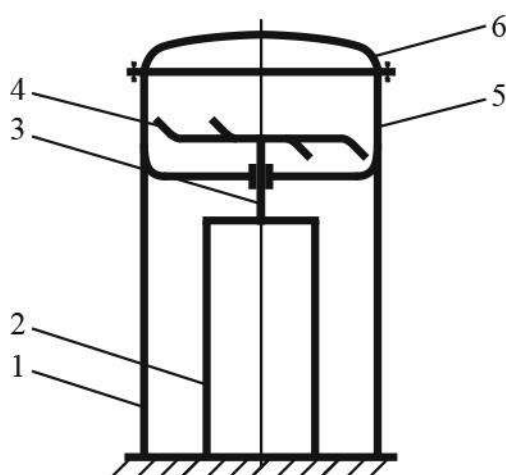


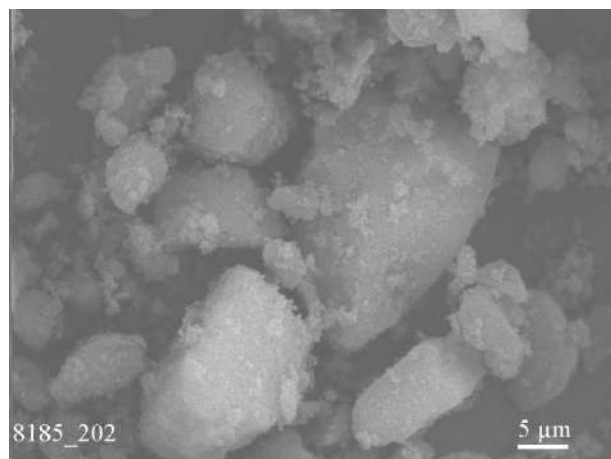
Рисунок 27 – Лопатева швидкохідній мішалка

1 – корпус; 2 – привід; 3 – вал; 4 – лопать; 5 – змішувальна камера; 6 - кришка

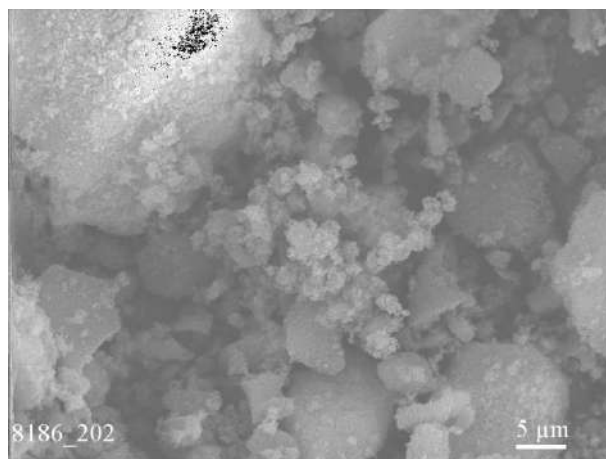
Для більш інтенсивного та якісного подрібнення мішалка має лопать досить складної конструкції, яка сприяє створенню інтенсивних турбулентних потоків при її

роботі і дозволяє отримувати подрібнений матеріал із якомога найменшим розміром частинок.

У результаті подрібнення отримуємо мікрметричні частинки із розвиненою поверхнею (рисунок 28)



А



Б

Рисунок 28 – Частинки отриманого діоксиду кремнію

Відповідно до мікрметричних знімків частинок подрібненого діоксиду кремнію можна стверджувати, що його основний розмір частинок складає значення які не перевищують 50 мкм. Для більш точного встановлення їх значень було проведено гранулометричний аналіз, відповідно до результатів мікрофотографій (рисунок 29).

Відповідно до результатів гранулометричного аналізу можна стверджувати, що отриманий диоксид кремнію має основний розмір у інтервалі 5-10 мкм. Що дозволяє його використовувати в якості наповнювача для таких полімерів як політетрафторетилел, кополімер тетрафторетилена з етиленом та полівініліденфторид та отримувати полімерні композиційні матеріали із високим рівнем властивостей.

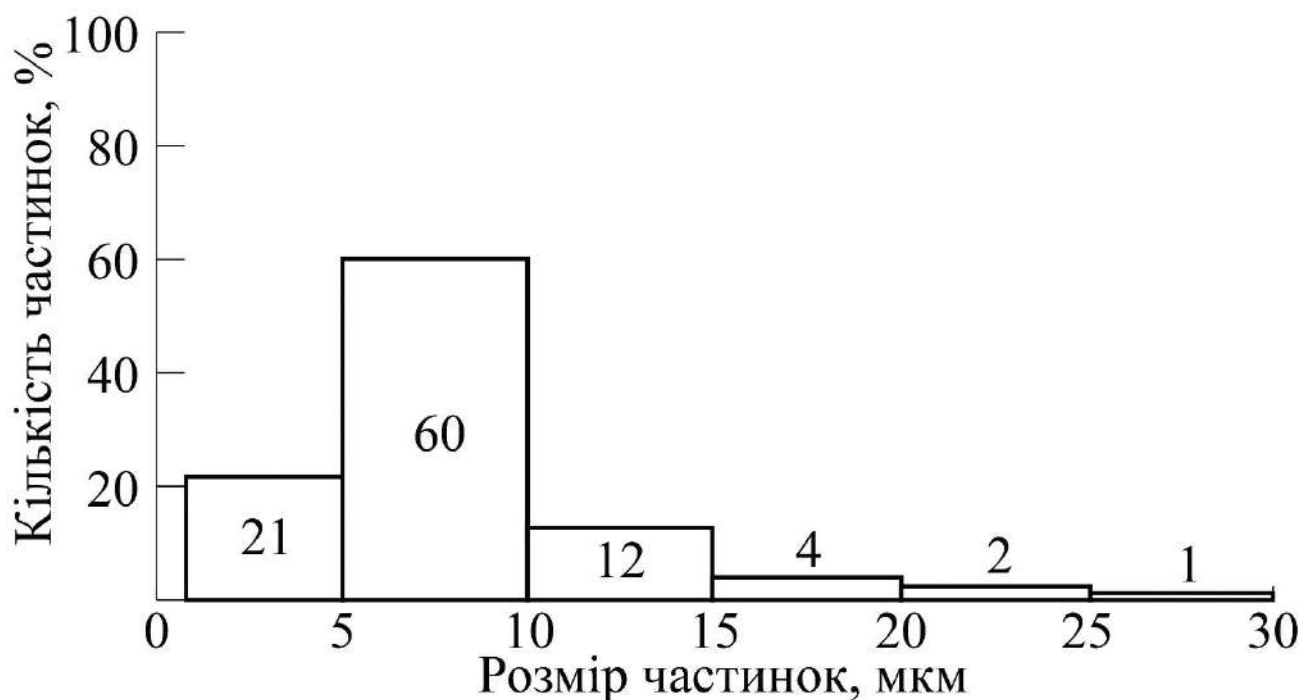


Рисунок 29 – Гранулометричний склад подрібненого диоксиду кремнію

3.1.3 Суміщення вихідних компонентів полімерної композиції

Стандартна методика отримання полімерних композицій дрібнодисперсних фторполімерів із наповнювачами полягає у їх суміщенні за допомогою швидкохідних мішалок із механічним перемішуючим пристроєм.

Під час [117] механічного змішування матеріалів, що мають відмінності у морфологічних (форма, розміри) та структурних (густина) характеристиках, важко досягти рівномірного розподілу компонентів у складі полімерної композиції. Це пов'язано з ефектом сегрегації — явищем, при якому частинки полімерів і наповнювачів розділяються під дією зовнішніх сил, зокрема гравітаційних і відцентрових. Схематичне зображення цього процесу представлено на рисунку 30.

Як видно з рисунка, на початковому етапі механічного змішування спостерігається зростання рівномірності розподілу компонентів, однак далі цей процес стабілізується, не досягаючи ідеального стану. Така неоднорідність викликає анізотропію властивостей готового полімерного композиційного матеріалу (ПКМ), а також формування в його структурі мікро- та макродефектів. Унаслідок цього

погіршується цілісність матеріалу й знижуються його експлуатаційні характеристики. З огляду на це, важливим є удосконалення технологічного етапу змішування для підвищення якості кінцевого продукту.

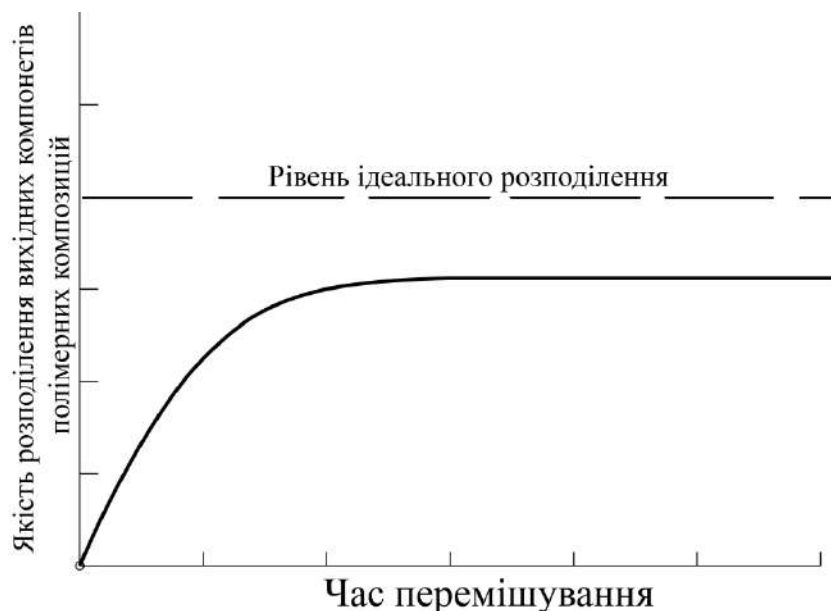


Рисунок 30 – Залежність якості розподілення вихідних компонентів полімерних композицій при використанні механічних перемішувачів

З урахуванням попередніх досліджень [118] було запропоновано замінити операцію суміщення вихідних компонентів полімерних композицій на механічних перемішувачах на фізико-хімічний метод (*in-situ*) суміщення полімерів з наповнювачем у процесі синтезу останнього.

Це дозволяє мінімізувати вплив сегрегації на якість розподілу диоксиду кремнію в об'ємі полімерів, що у свою чергу призведе до покращення властивостей матеріалів, отриманих із створених полімерних композитів. Також заміна методу суміщення вихідних компонентів на запропоновану дозволяє спростити технологію переробки полімерних композиційних матеріалів на основі фторполімерів, наповнених диоксидом кремнію та зменшить собівартість виготовлення виробів з них.

Відповідно до проведених раніше досліджень щодо визначення гранулометричного складу фторполімерів встановлено, що основний розмір

частинок ПТФЕ складає від 20-30 мкм, КТФЕ – 1-5 мкм і ПВДФ – 1-10 мкм. Тому суміщення цих полімерів із дрібнодисперсним диоксидом кремнію (основний розмір частинок 5-10 мкм) можливо здійснити за допомогою стандартних процесів змішування дрібнодисперсних матеріалів.

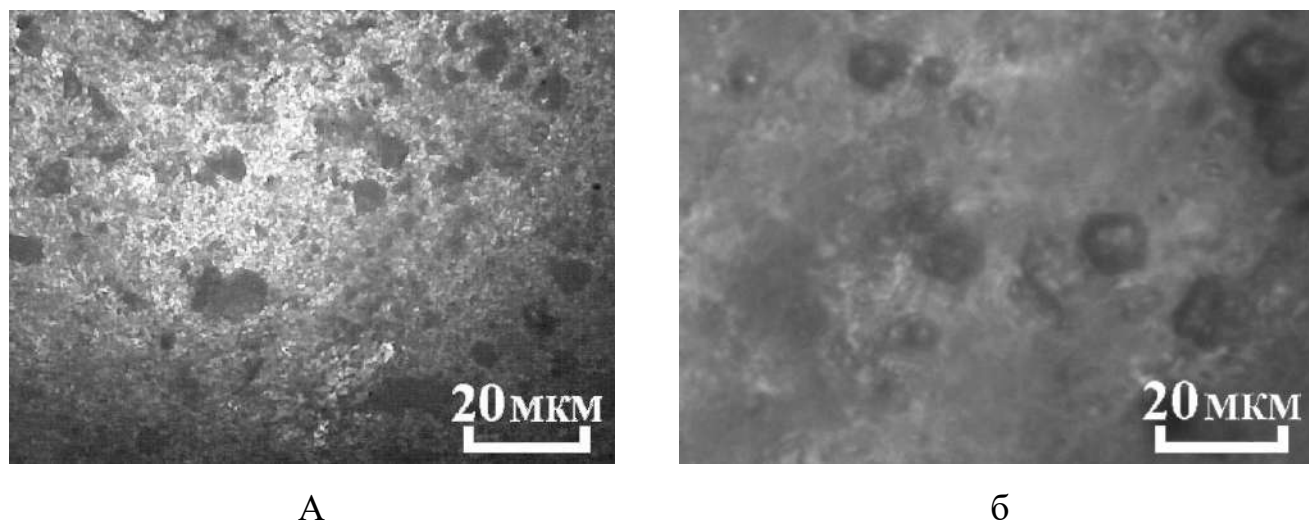
Досить ефективним методом змішування є електромагнітний [119]. Він полягає у активній дії дисперсних мелючих тіл, які хаотично переміщуються у магнітному полі змішувача на компоненти полімерної композиції змушуючи їх рівномірно розподілитися в об'ємі та подрібнюючи агломерати наповнювача. Однак використання цього обладнання має досить суттєвий недолік, який полягає у засміченні полімерної композиції продуктами зношування мелючих тіл.

Тому для суміщення вихідних компонентів полімерної композиції було використано стандартний метод механічного змішування. Для цього використана швидкохідна механічна мішалка із складною конструкцією лопатей для більш інтенсивного та якісного процесу змішування.

Одним із основних недоліків цього методу змішування дрібнодисперсних матеріалів є їх відносно невисока якість перемішування, яка впливає на рівномірність розподілу наповнювача в полімері. Це оказує негативний вплив на рівень властивостей отриманих полімерних композитів.

У роботі рівномірність розподілу наповнювача у композитах оцінювали за фото поверхонь сколів досліджених полімерних композитів отриманих на оптичному мікроскопі (рисунок 31).

Кількісний розрахунок якості розподілення вихідних компонентів у полімерних композитах здійснювався за допомогою знаходження їх коефіцієнту неоднорідності, який визначається за порівнянням площ, що займає диоксид кремнію та фторполімер на поверхнях сколів розроблених матеріалів.



А

Б

Рисунок 31 – Мікрофотографії поверхонь полімерних композитів силікагель + фторполімер: а – КТФЕ; б – ПВДФ.

Отримані результати розрахунків приведені на графіку (рисунок 32).

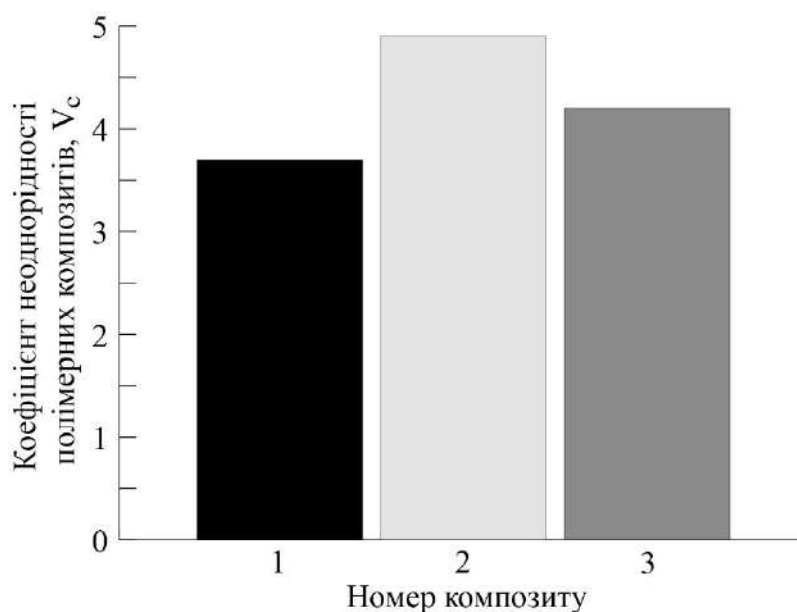


Рисунок 32 - Значення коефіцієнта неоднорідності V_c полімерних композитів силікагель + фторполімер: 1 – ПТФЕ; 2 – КТФЕ; 3 – ПВДФ.

Відповідно до них можна стверджувати, що полімерні композиційні матеріали, які отримані згідно із стандартним методом змішування дрібнодисперсних матеріалів мають середню якість розподілення силікагелю у

фторполімерах. Причому відповідно до результатів отриманих у роботах [120] покращити цей параметр у полімерних композитах, отриманих за даною методикою суміщення вихідних компонентів полімерної композиції практично неможливо. Тому нами була запропонована нова методика отримання полімерних композитів на основі фторполімерів та диоксиду кремнію силікагелю, яка полягає в (*in situ*) суміщенні вихідних компонентів їх полімерних композиції в процесі синтезу наповнювача.

Згідно з цією методикою дрібнодисперсні фторполімери додаються у реакційноактивне рідинне середовище де відбувається синтез диоксиду кремнію із водяного розчину метасилікату натрію, який при постійному перемішуванні підкислюється розбавленою соляною кислотою. Схема (*in situ*) суміщення вихідних компонентів полімерних композицій на основі фторполімерів і силікагелю у процесі синтезу наповнювача зображена на рисунку 36.

Відповідно до неї у водневий розчин силікату натрію при постійному його перемішуванні додаються тверді частинки фторполімеру (рисунок 33, а). Створена при цьому суспензія є системою в якій тверді частинки полімеру знаходяться у хаотичному русі і рівномірно розподілені у рідинному середовищі (рисунок 33, б). Отримана суспензія підкислюється 10% водяним розчином HNO_3 до рН 6,5–7,5 (рисунок 33, в). При цьому відбувається практично моментальне утворення застиглого аквагелю в якому знаходяться рівномірно розподілені частинки фторполімеру (рисунок 33, г). Отриману систему акварель+фторполімер піддають поступовій сушці при температурі 30-40°C (рисунок 33, д) при якій відбувається значне зменшення її об'єму за рахунок випаровування вологи із аквагелю, що приводить до його усадження з охопленням при цьому твердих частинок фторполімерів (рисунок 33, е). Створена система ксерогель+фторполімер відмивається у дистильованій воді з метою видалення побічних продуктів реакції (сіль, кислотні рештки) і додатково підсушується. Отримана при цьому полімерна композиція (рисунок 33, ж) йде на подальшу переробку у виробі.

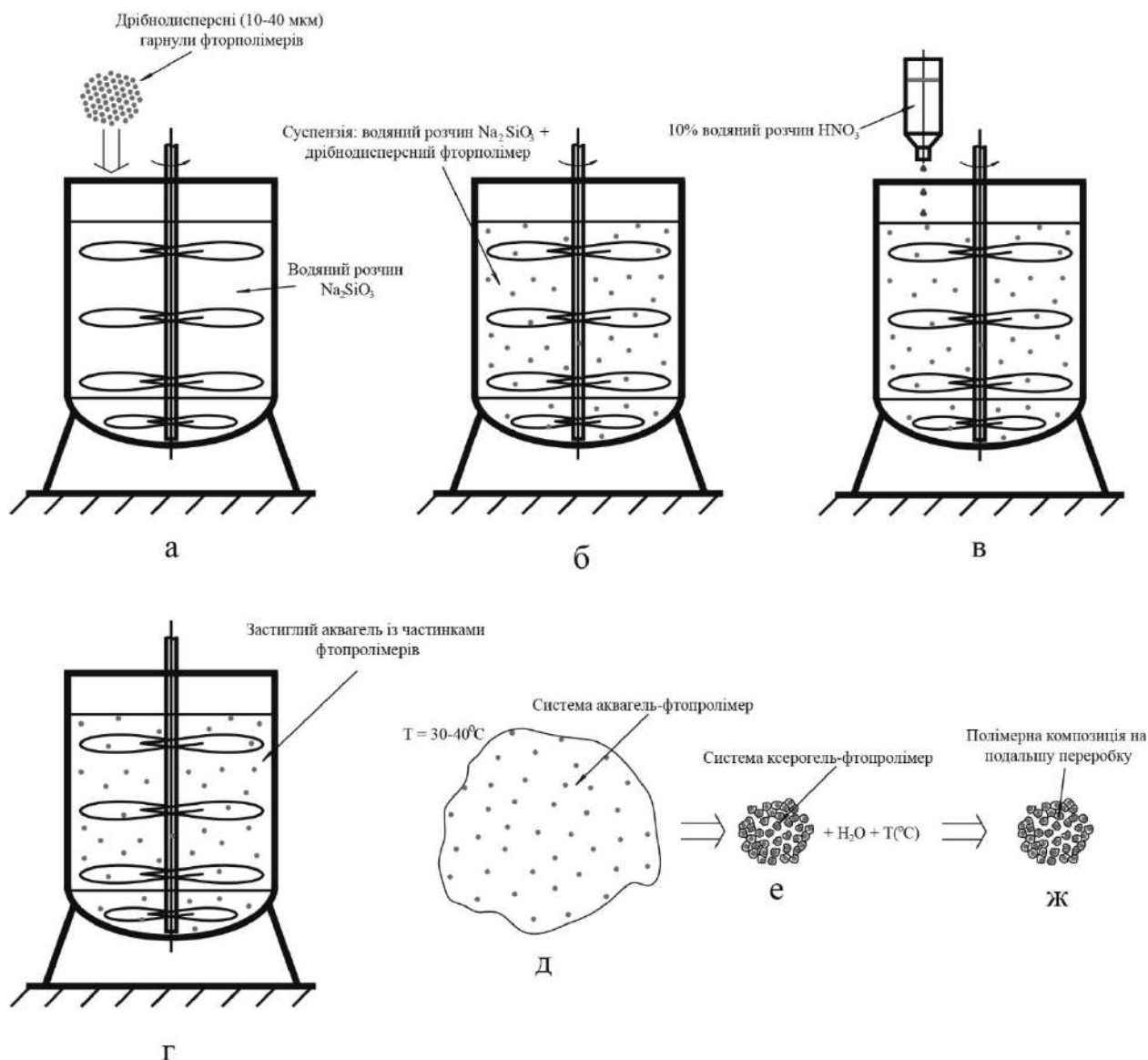


Рисунок 33 - Схема (in situ) суміщення вихідних компонентів полімерних композицій на основі фторполімерів і силікагелю у процесі синтезу наповнювача

Оцінку якості розподілення диоксиду кремнію у полімерних композитах, отриманих за запропонованою схемою, проводили за знаходженням коефіцієнту їх неоднорідності. Результати приведені у таблиці 3.

Відповідно до отриманих результатів коефіцієнт неоднорідності композицій на основі ПТФЕ та ПВДФ, отриманих за допомогою (in situ) суміщення вихідних компонентів має на 55-60% менші значення ніж для композицій, отриманих за стандартним методом. Причому їх значення відповідають високі якості розподілення наповнювача у полімерній матриці. Для матеріалу на основі КТФЕ

спостерігається збільшення коефіцієнту неоднорідності з 4,9 до 7,8. Це пояснюється складнощами розподілу частинок КТФЕ у реакційному середовищі при синтезі силікагелю, коли, навіть при інтенсивному перемішуванні, неможливо було отримати суспензію із рівномірно розподіленими частинками твердої речовини (полімер не тонує і знаходився на поверхні водяного розчину силікату натрію).

Таблиця 3 – Значення коефіцієнтів неоднорідності розподілення силікагелю у полімерних композитах

Метод отримання полімерної композиції	Значення коефіцієнту неоднорідності VC		
	ПТФЕ + SiO ₂	КТФЕ + SiO ₂	ПВДФ + SiO ₂
Стандартний	3,7	4,9	4,2
In situ	2,1	7,8	2,6

Отримані за механічним та (in situ) методом суміщення полімерні композиції йдуть на подальшу переробку.

3.1.4 Брикетування полімерних композицій та визначення оптимальних параметрів брикетування

Досить суттєвий внесок у технологічність процесу переробки фторполімерів у виробі вносить операція брикетування на підготовчому етапі переробки.

Брикетування це операція із формування фторполімеру чи полімерних композитів на його основі, які мають вигляд порошків або волокон, у однорідні по масі та форми заготовки. Використання брикетів із полімерів, як і з інших матеріалів, має ряд переваг перед не брикетованими [121]:

- заміняє дозування по об'єму або по масі на поштучне;
- покращує умови попереднього підігріву;
- зменшує розміри камер завантаження у формі для переробки.

Все це дозволяє зменшити витрати часу на виготовлення виробів із фторполімерів та покращує умови праці, що значно підвищує рівень технологічності при переробці їх у вироби.

Тому актуальним питанням є визначення оптимальних параметрів таблетування при переробці фторполімерів у вироби.

Однією із основних характеристик, яка впливає на можливість брикетування полімерів є розміри їх елементарних частинок. Так відомо [124], що матеріали із розмірами менше 200 мкм добре брикетуються при тисках до 50 МПа.

Відповідно до проведених досліджень основний розмір фторполімерів знаходиться в інтервалі від 2 до 30 мкм, а частинок отриманого диоксиду кремнію від 5 до 10 мкм. Тому максимальний тиск при брикетуванні полімерних композицій не повинен перевищувати 50 МПа.

До основних технологічних параметрів процесу переробки фторполімерів у вироби на стадії брикетування відносяться тиск брикетування (P_b) та час (t_b) витримки під тиском [117]. Вибір їх оптимальних значень і є основним завданням даного підрозділу. При недостатньому тиску та часу витримки не вдається отримати суцільний брикет (рис. 36в), який руйнується, як при брикетуванні (рис. 34 а) так і у процесі подальшої переробки (рис. 34 б).

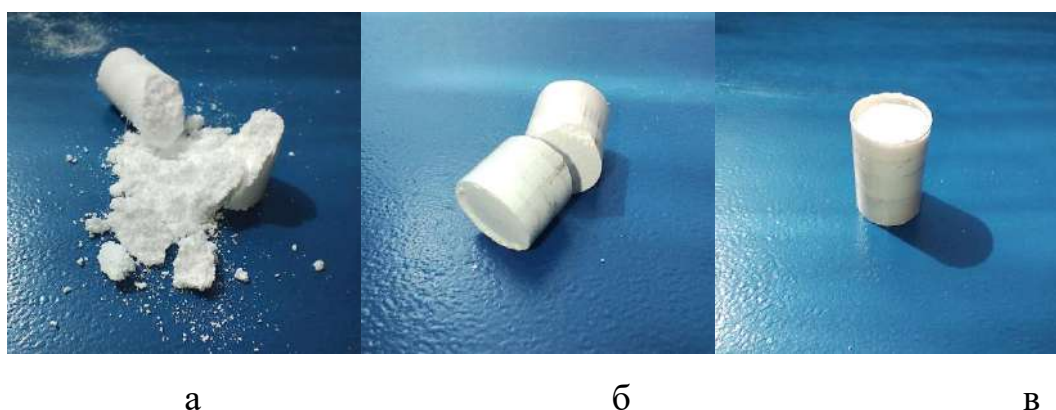


Рисунок 34 – Брикети із фторполімеру зруйнований (а) в процесі брикетування, (б) завантаження у прес-форму із підігрівом та (в) суцільний брикет

Тому являє зацікавленість визначити оптимальні значення тиску при брикетуванні та часу витримки під тиском з точки зору отримання суцільного брикету та витрати мінімальних ресурсів. Суцільність брикетів у даній роботі визначається непрямым методом по значенням їх щільності. Відповідно до цього суцільним можна вважати брикет, який має близькі до максимального чи максимальні значення щільності. Відомо [123], що найбільш щільні матеріали є найбільш міцними. Результати залежності щільності брикетів із фторполімерів від тиску брикетування(рисунок 35).

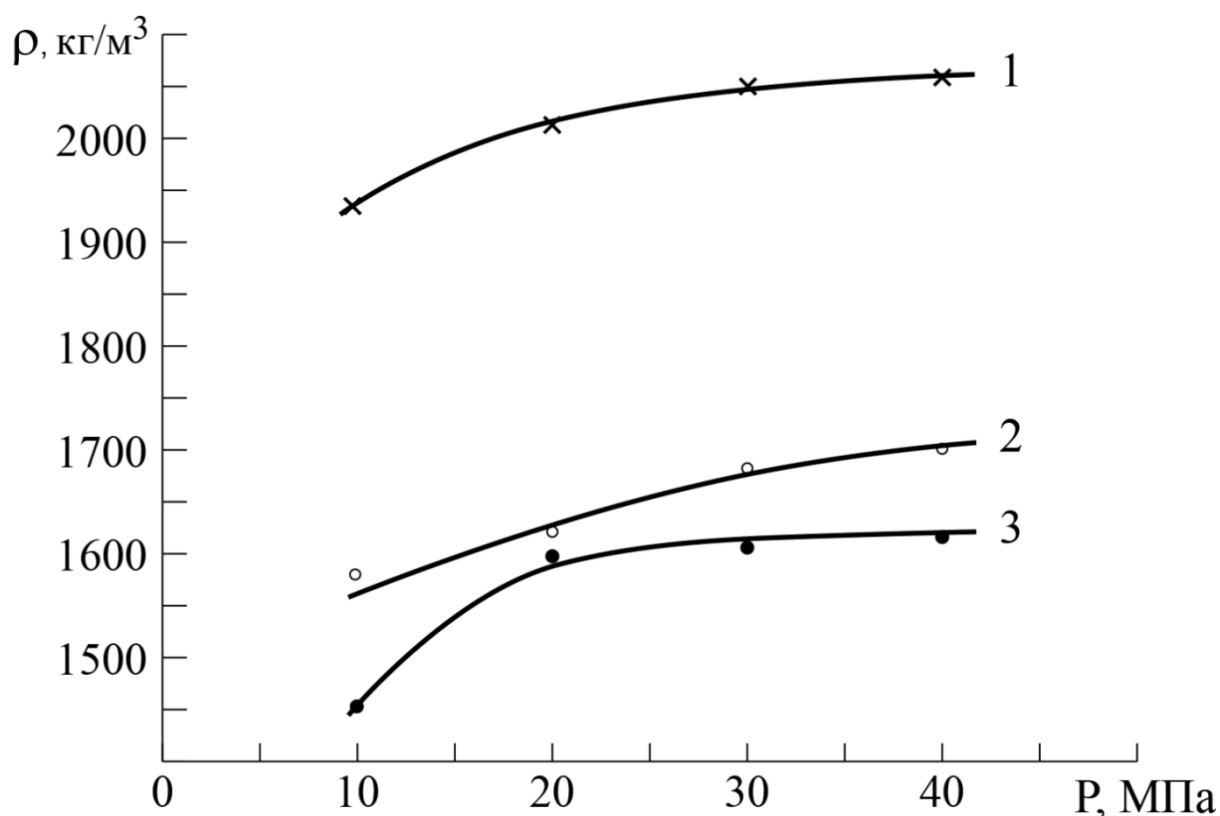


Рисунок 35 – Залежність щільності брикетів (ρ) від тиску брикетування (P) прес-порошків на основі фторполімерів: 1 – політетрафторетилен; 2 – кополімер тетрафторетилену з етиленом; 3 – полівініліденфторид.

(час витримки під тиском 60 сек)

Відповідно до отриманих результатів (рисунок 35) можна стверджувати що для всіх досліджених матеріалів із підвищенням тиску брикетування спостерігається

збільшення значень щільності брикетів. Що пов'язано із перерозподілом частинок прес порошку у об'ємі формуючої порожнини прес-форми із їх деяким деформуванням. Причому слід відмітити, що інтенсивність збільшення щільності із збільшенням тиску брикетування зменшується. Її максимальні значення досягаються у межі досліджених тисків від 10 до 20 МПа. При подальшому збільшенні тиску брикетування інтенсивність зростання щільності брикетів значно зменшується і її значення стабілізуються, що говорить про досягнення максимально можливих значень щільності брикетів при умовах проведення експерименту. І відповідно до отриманих результатів для всіх досліджених прес-порошків на основі фторполімерів в якості оптимального тиску брикетування можна рекомендувати інтервал 25 - 30 МПа. Що обумовлено з одного боку практично максимальними значеннями щільності, а з іншого економічною доцільністю, яка пов'язана із використанням додаткової енергії при брикетуванні для створення більших тисків.

Результати досліджень впливу часу витримки під тиском брикетів зі фторполімерів (рисунок 36).

Відповідно до отриманих результатів (рисунок 38) щільність брикетів збільшується із зростанням часу витримки їх під тиском. При цьому із збільшенням часу витримки під тиском інтенсивність збільшення щільності брикетів зменшується. Своїх максимальних значень щільність досягає починаючи з 60 секунд витримки. При подальшому збільшенні часу витримки під тиском вона незначно зростає.

Згідно отриманих результатів для всіх досліджених прес – порошків на основі фторполімерів в якості оптимального часу витримки під тиском при брикетуванні можна рекомендувати 60 – 90 секунд. Що пояснюється з одного боку практично максимальними значеннями щільності брикетів, що були досягнуті, а також оптимумом з точки зору енерговитрат на брикетування.

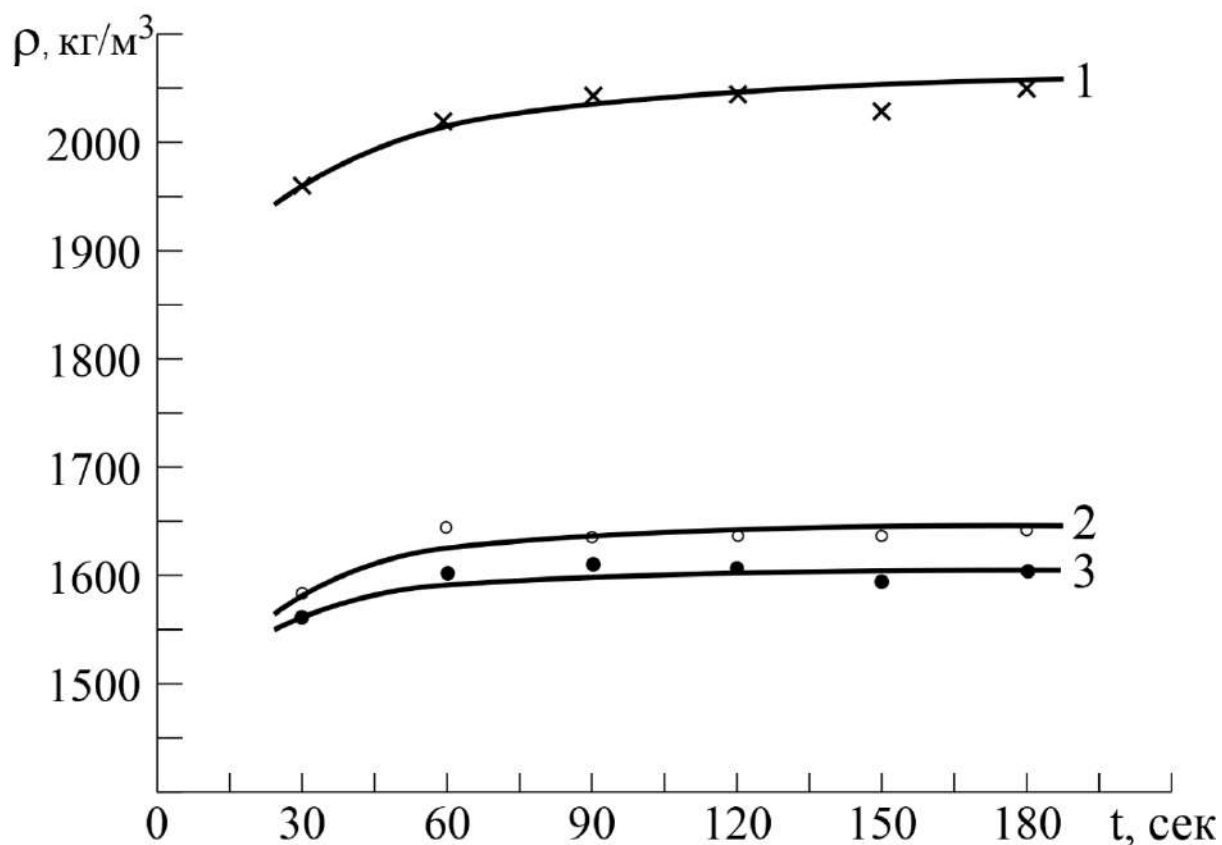


Рисунок 36 – Залежність щільності брикетів (ρ) від часу витримки під тиском (t) прес-порошків на основі фторполімерів: 1 – політетрафторетилен; 2 – кополімер тетрафторетилену з етиленом; 3 – полівініліденфторид.

(тиск брикетування 20 МПа)

Відповідно до проведених досліджень оптимальними значеннями тиску брикетування та часу витримки брикетів під тиском є 25 - 30 МПа та 60 – 90 секунд відповідно. При цих параметрах переробки нами були отримані суцільні брикети, які не руйнуються в процесі переробки їх у вироби.

3.2 Основний етап переробки

У більшості випадків для виготовлення виробів з фторполімерів на масовому і серійному виробництвах застосовують високопродуктивні методи лиття під тиском та екструзію, що є оптимальним з точки зору собівартості виробів. Проте вартість обладнання і необхідного устаткування (литтєві форми, екструзійні головки тощо)

досить велика, що обмежує використання цих методів переробки на одиничних виробництвах. Тому стає актуальним використання таких методів переробки фторполімерів, як спікання та компресійне пресування у формах із підігрівом. Для отримання виробів із фторполімерів із найкращим рівнем властивостей необхідно визначити основні параметри їх переробки, що і є основним завданням цього підрозділу.

Найбільший вплив на властивості виробів із фторполімерів оказує основний етап переробки. До основних параметрів пробки відносяться температура, тиск тощо [30, 124].

3.2.1 Обґрунтування оптимальної температури переробки

Для визначення оптимальної температури переробки фторполімерів необхідно, спочатку, задатися інтервалом температурних досліджень. Мінімальна температура переробки буде відповідати температурі плавлення (чи розм'якшення) цих матеріалів. Температуру плавлення визначали за термомеханічними кривими полімерів. На рисунку 37 показані результати таких досліджень.

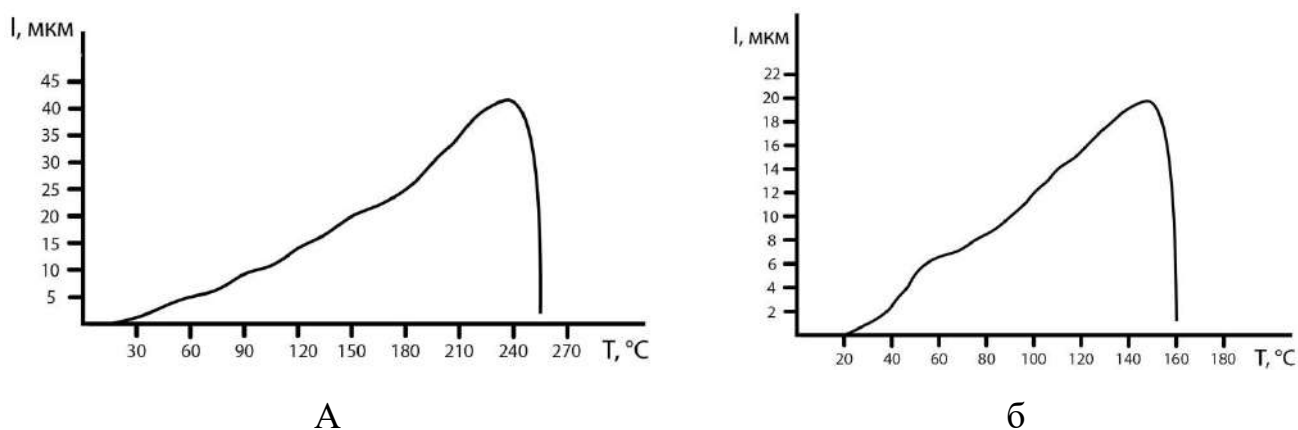


Рисунок 37 – Термомеханічні криві фторполімерів: 1 – кополімер тетрафторетилену з етиленом; 2 – полівініліденфторид.

Відповідно до результатів досліджень можна стверджувати, що для кополімеру тетрафторетилену з етиленом ця температура лежить у межах 238-242°C, а для полівініліденфториду - 148-152°C.

Максимальна температура переробки досліджених полімерів буде дорівнювати температурі їх початку активної деструкції, коли молекули полімеру під дією температури руйнуються. Цю температуру визначали за термогравіметричним аналізом полімерів. Їх результати приведені на рисунку 38.

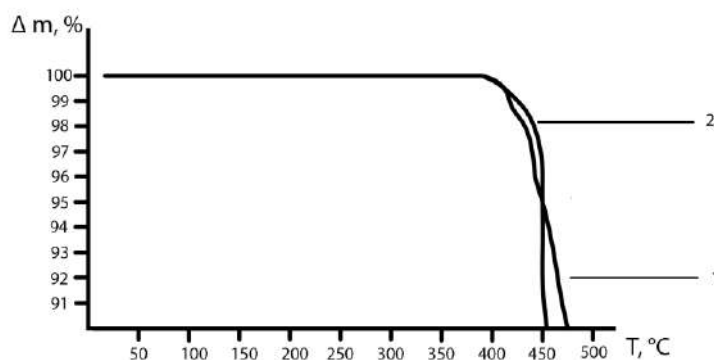


Рисунок 38 – Термогравіметричний аналіз фторполімерів: 1 - кополімер тетрафторетилену з етиленом; 2 – полівініліденфторид

Відповідно до результатів термогравіметричних досліджень температура початку активної деструкції для кополімеру тетрафторетилену з етиленом дорівнює – 430°C, а для полівініліденфториду - 420°C. Тобто можна стверджувати, що ці температури є максимально можливими при переробці досліджених полімерів у виробі.

Відповідно до проведених досліджень можна стверджувати, що кополімер тетрафторетилену з етиленом можна переробляти у виробі в інтервалі температур від 240 до 430°C, а полівініліденфториду від 150 до 420°C. Тобто для подальших досліджень щодо визначення оптимальних температур переробки фторполімерів будемо використовувати саме ці температури.

Визначення оптимальної температури переробки фторполімерів проводили непрямим методом за допомогою дослідження впливу температури переробки на фізико-механічні властивості полімерів. При цьому мінімальну та максимальну температуру переробки брали відповідно до вище приведеного інтервалу (для кополімер тетрафторетилену з етиленом – 240 і 430°C, полівініліденфториду - 150°C і 420°C). Слід відмітити, що максимальні температури переробки не були більшими за вище приведені, однак коригувалися виходячи із значень отриманих фізико-механічних властивостей полімерів з точки зору технологічної та економічної доцільності їх використання.

На рисунку 39 представлені результати досліджень впливу температури при переробці кополімеру тетрафторетилену з етиленом на його густину та напруження при межі текучості при стисканні.

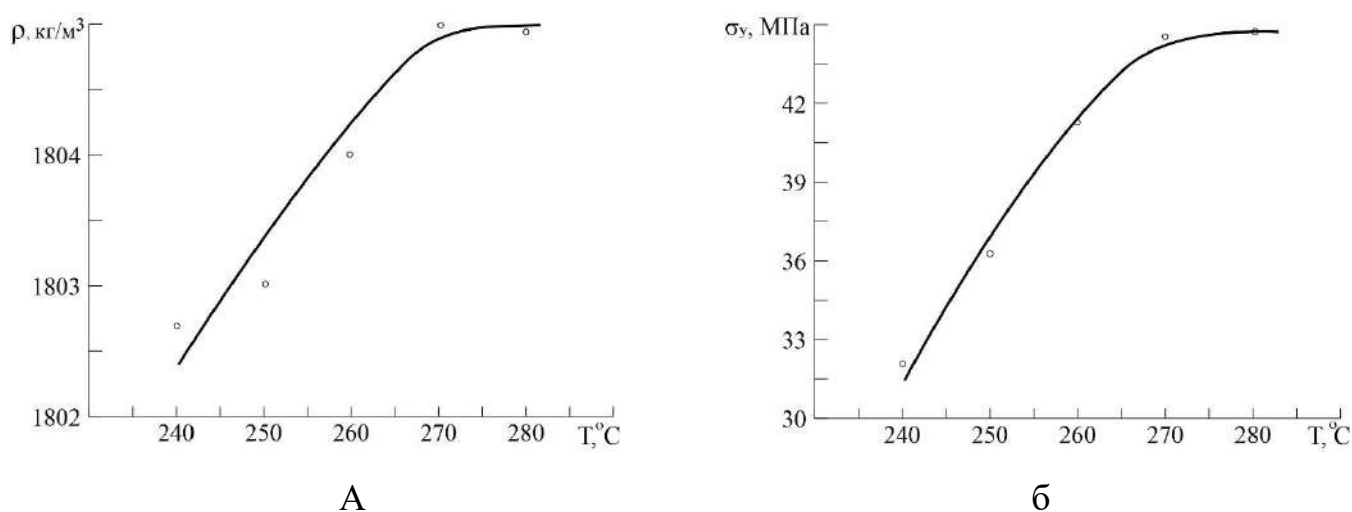


Рисунок 39 – Залежності (а) густини (ρ) та (б) напруження при межі текучості при стисканні (σ_y) від температури при переробці кополімеру тетрафторетилену з етиленом

Тиск пресування = 40 МПа

Відповідно до результатів проведених досліджень можна стверджувати, що отримані залежності мають подібний характер. Так із збільшенням температури переробки з 240 до 280°C густина та напруження при межі текучості при стисканні

кополімеру тетрафторетилену з етиленом збільшується з 1802,7 до 1805,0 кг/м³ та з 32 до 45 МПа відповідно. Причому найбільш інтенсивне збільшення спостерігається при температурах від 240 до 270°C, а потім значення відповідних величин стабілізуються. Відповідно до цього можна стверджувати, що температура при якій значення густини та напруження при межі текучості при стисканні досягли максимальних значень можна вважати оптимальною температурою переробки досліджуваного полімеру. Тобто для кополімеру тетрафторетилену з етиленом це 270°C. Подальше збільшення температури переробки недоцільне з технологічної та економічної точки зору.

На рисунку 40 представлені результати досліджень впливу температури при переробці полівініліденфториду на його густину та напруження при межі текучості при стисканні.

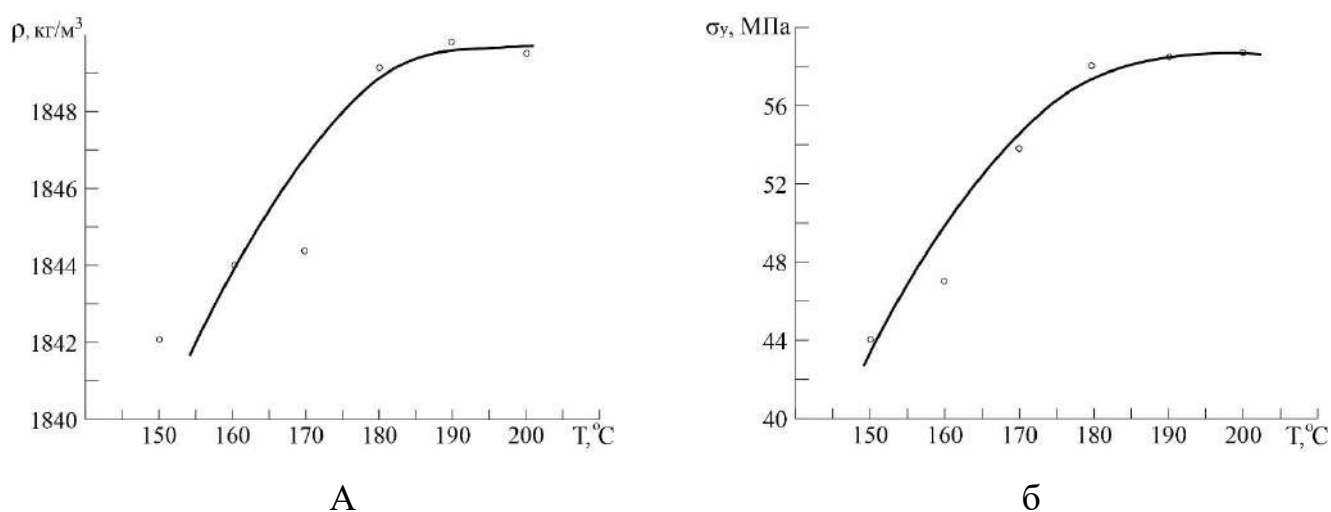


Рисунок 40 – Залежності (а) густини (ρ) та (б) напруження при межі текучості при стисканні (σ_y) від температури при переробці полівініліденфториду
Тиск пресування = 40 МПа

Відповідно до результатів досліджень видно, що отримані залежності мають подібний характер. Збільшення температури пробки полімеру з 150 до 200°C призводить до збільшення його густини з 1842 до 1850 кг/м³ та напруження при межі текучості при стисканні з 44 до 58 МПа. Також слід відмітити, щонайбільша

інтенсивність збільшення досліджених властивостей спостерігається при температурах від 150 до 180°C із подальшим її різким зниженням і стабілізацією досліджених властивостей.

Відповідно до проведених досліджень можна стверджувати, що температуру при якій значення густини та напруження при межі текучості при стисканні досягли максимальних значень можна вважати оптимальною температурою переробки досліджуваного полімеру. Для полівініліденфториду вона дорівнює 180°C. Подальше збільшення температури переробки недоцільне з технологічної та економічної точки зору.

Збільшення фізико-механічних властивостей досліджених полімерів із збільшенням їх температур переробки пояснюється зміною їх структури. Для доведення цього припущення були проведені рентгеноструктурний аналіз фторполімерів, отриманих при різних температурах переробки. Результати досліджень зображені на рисунку 41.

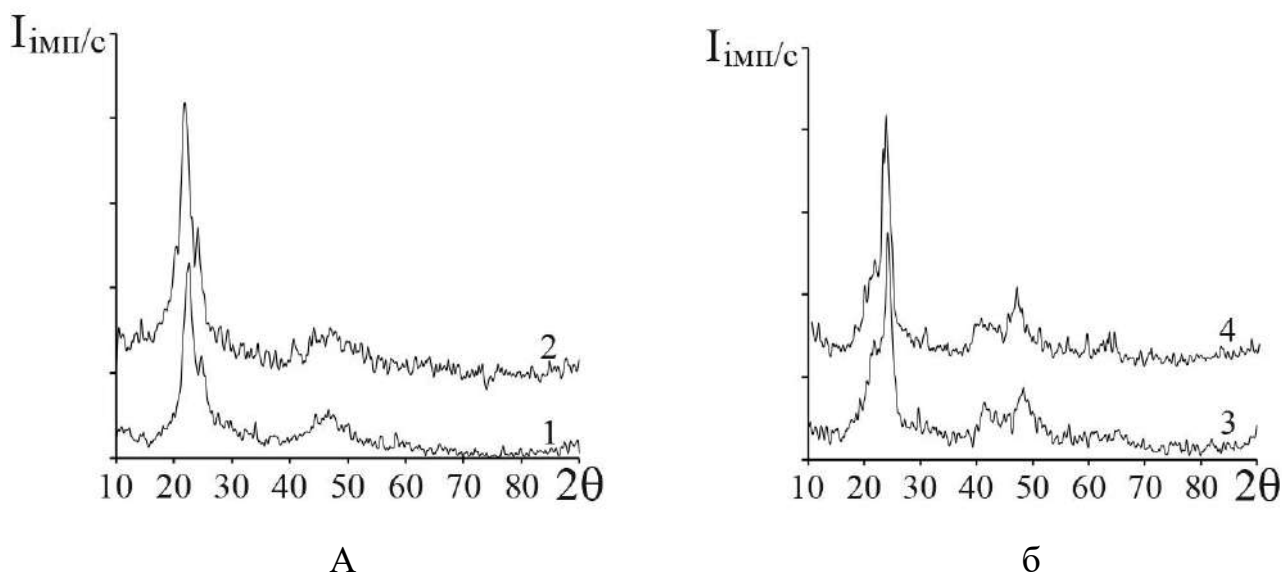


Рисунок 41 – Рентгенограми (а) кополімеру тетрафторетилену з етиленом та (б) полівініліденфториду, які переробляються при температурах: 1 – 250; 2 – 270; 3 – 160; 4 – 200°C

Для всіх досліджених полімерів спостерігаються два яскраво виражених аморфних гало в області кутів Вульфа-Брегга (2Θ) 15-30 та 40-60, які є свідченням наявності аморфної фази у досліджених матеріалів. Також на рентгенограмах зображено два яскраво виражені піки в області кутів (2Θ) 20–21 та 53–55, які характеризують їх кристалічну фазу. Тобто фторполімери на основі кополімеру тетрафторетилену з етиленом та полівініліденфториду є переважно аморфними матеріалами із різним ступенем кристалічності. Відповідно до розрахунків ступінь кристалічності кополімеру тетрафторетилену з етиленом отриманого при температурі переробки 250°C складає 30%, а при температурі 270°C – 40%. Для полівініліденфториду ступінь кристалічності зразків отриманих при 160°C дорівнює 50%, а при температурі 200°C – 60%. Це підтверджує припущення, що збільшення температури переробки досліджених фторполімерів призводить до покращення їх фізико-механічних властивостей за рахунок зміни структури досліджених полімерів (збільшення ступеня кристалічності). Що повністю співпадає із законами фізики згідно з якими, у більшості випадків, матеріали, які мають вищу ступінь кристалічності є більш міцними ніж ті, що мають меншу.

3.2.2 Обґрунтування оптимального тиску при переробці

Досить суттєвий вплив на рівень властивостей оказує не тільки температура, а і тиск при якому проводять переробку полімерів. Тому встановлення його оптимального значення є актуальною задачею.

На рисунках 42 та 43 показані залежності густини та межі текучості при стисканні досліджених фторполімерів від тиску пресування при їх переробці у виробі. Експерименти проведені на зразках, які отримані при оптимальних температурах переробки для досліджених полімерів (кополімер тетрафторетилену з етиленом 270°C і полівініліденфторид – 180°C).

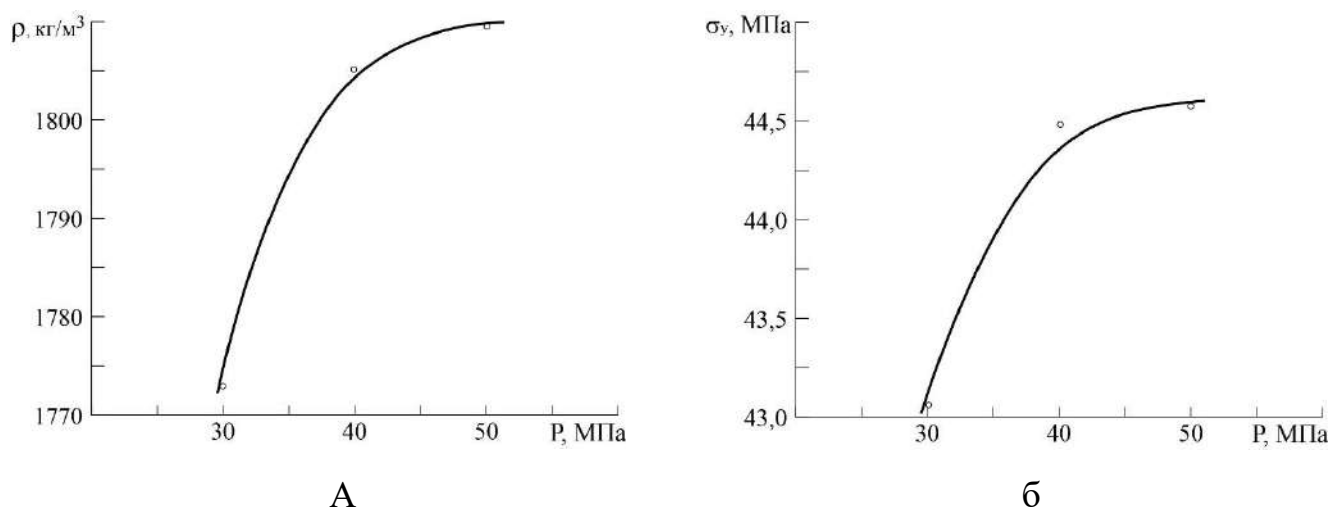


Рисунок 42 – Залежності (а) густини (ρ) та (б) напруження при межі текучості при стисканні (σ_y) від тиску пресування (P) при переробці кополімеру тетрафторетилену з етиленом

Температури при переробці = 270°C

Відповідно до проведених досліджень (рисунок 42) можна стверджувати, що із збільшенням тиску пресування при переробці кополімеру тетрафторетилену з етиленом збільшуються його фізико-механичні характеристики (густина, напруження при межі текучості при стисканні). Причому найбільш інтенсивне збільшення цих характеристик спостерігається при тисках від 30 до 40 МПа. Подальше збільшення тисків пресування до 50 МПа не призводить до значного росту досліджених характеристик, що дозволяє стверджувати, що з технологічної та економічної точки зору оптимальним тиском при пресуванні кополімеру тетрафторетилену з етиленом є 40 МПа.

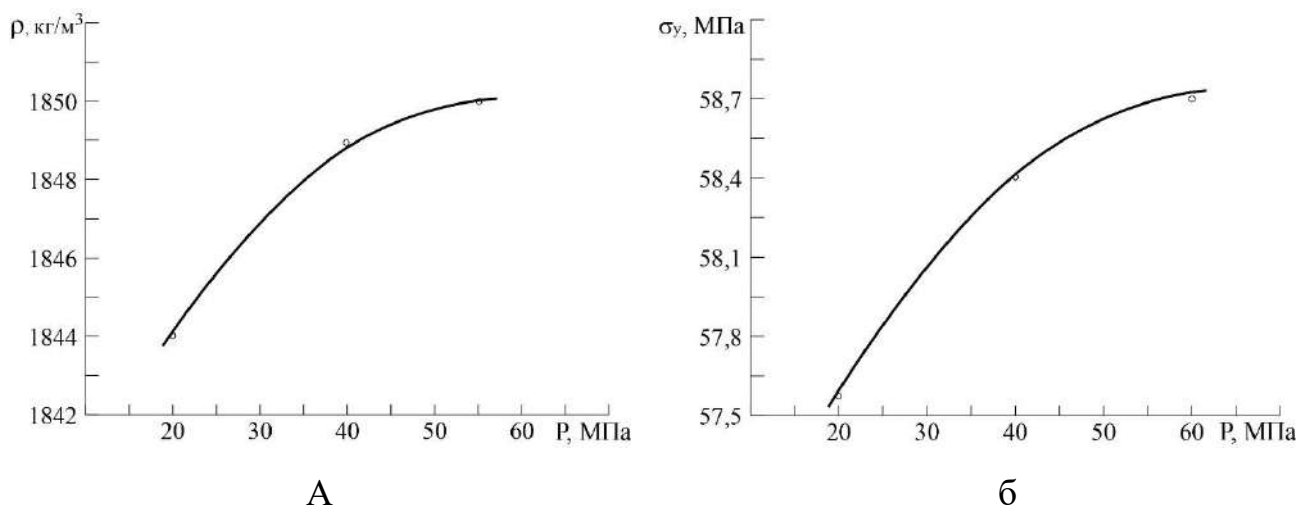


Рисунок 43 – Залежності (а) густини (ρ) та (б) напруження при межі текучості при стисканні (σ_y) від тиску пресування (P) при переробці полівініліденфториду

Температури при переробці = 180°C

Дослідження впливу тиску пресування на густину та напруження при межі текучості при стисканні полівініліденфториду мають подібні, за характером, залежності експериментальних даних (рисунок 43). Так із збільшенням тиску фізико-механичні властивості досліджуваного полімеру інтенсивно збільшуються при тисках від 20 до 40 МПа із подальшою стабілізацією. Це дозволяє визначити оптимальним тиском при переробці полівініліденфториду 40 МПа.

3.3 Заключний етап переробки

У більшості ситуацій після первинного формування полімерних виробів виникає потреба в подальшій механічній обробці для забезпечення необхідної якості поверхонь і досягнення потрібних експлуатаційних властивостей. Також така обробка є актуальною при виготовленні складноконфігураційних деталей, які важко отримати методами формування [125], наприклад, шестерень, елементів підшипників, корпусних частин і панелей. Механічна обробка є ефективним рішенням у разі виготовлення обмежених партій деталей або одиничного

виробництва, коли витрати на створення формоутворювального оснащення є занадто високими й економічно невиправданими.

Обробляючи полімери, необхідно враховувати їхні характерні структурні та фізико-механічні особливості. Це зокрема мала щільність, низька твердість і теплостійкість, слабка теплопровідність, значна віброопірність, а також високий абразивний вплив на ріжучий інструмент. Усе це необхідно враховувати при виборі інструментального матеріалу й визначенні параметрів різання для обробки полімерних матеріалів і композицій на їх основі.

Більшість полімерних систем досить добре піддаються різанню на стандартному металообробному устаткуванні. Проте режими обробки (швидкість, подача, глибина різання) та ріжучий інструмент відрізняються від тих, що використовуються для металів, і підбираються залежно від властивостей конкретного полімеру. Важливо звертати увагу на температуру в зоні різання, адже перегрів може призвести до деформації, деструкції матеріалу або до вивільнення шкідливих газів і пилу.

Токарні роботи з полімерними деталями, як правило, проводять на універсальних токарних верстатах або автоматах при високих швидкостях різання, знімаючи тонкий шар матеріалу. Зазвичай охолодження не застосовується, однак при обробці термопластів температура в зоні різання має залишатися в межах 100–120 °С, а для термореактивів допустима температура становить 200–300 °С. Цей температурний режим залежить не лише від швидкісних і геометричних параметрів різання, а й від вибору інструмента, якості його заточування та матеріалу ріжучої частини.

Для токарної обробки полімерів і композицій на їхній основі застосовують різці з ріжучою частиною, виготовленою зі швидкорізальної сталі (наприклад, Р6М3, Р9, Р12), твердих сплавів (ВК4, ВК8, Т15К6), металокераміки (ЦМ332), кубічного нітриду бору (ельбор) або алмазу. Ці матеріали мають високу термостійкість і теплопровідність [126].

Оскільки створені нами композиційні матеріали містять тверді включення на основі діоксиду кремнію, для їх обробки доцільно використовувати ріжучий інструмент із твердосплавним клином, який є економічно доступним і зносостійким.

Як зазначено в нормативних рекомендаціях [223. Р 50-28-87 ...], під час обробки полімерів варто збільшувати задній кут різця до $15\text{--}25^\circ$, оскільки полімери мають високу пружність, що збільшує площу контакту інструмента з оброблюваною поверхнею, спричиняючи швидке зношування і підвищене тепловиділення. Для термопластів, які утворюють безперервну стружку, рекомендований передній кут знаходиться в межах $10\text{--}20^\circ$. У випадку з термореактивами з ламкою стружкою доцільно використовувати передній кут $0\text{--}5^\circ$, а вершину різця виконувати із закругленням радіусом $1,5\text{--}3,0$ мм. Основний кут у плані для прохідного різця становить 45° , допоміжний – $0\text{--}5^\circ$, а нахил ріжучої кромки – нульовий.

Враховуючи ці рекомендації, для обробки виготовлених нами полімерних композицій було обрано інструмент з такими геометричними параметрами: задній кут – 20° , передній – 10° , головний кут у плані – 45° , допоміжний – 3° , кут нахилу ріжучої кромки – 0° .

РОЗДІЛ 4

ВПЛИВ СКЛАДІВ ТА МЕТОДІВ ПЕРЕРОБКИ НА ВЛАСТИВОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

Сучасні машини і механізми працюють при досить високих рівнях навантажень, швидкостей та температур, забезпечуючи при цьому високу рівень продуктивності [128,111]. Це дозволяє задовольнити постійно зростаючі потреби людства.

Разом із збільшенням продуктивності у більшості випадків значно зменшується надійність та довговічність техніки, що призводить до її передчасного виходу із ладу та простою [130]. Збільшення рівня цих параметрів може проходити за двома напрямками, які полягають у кардинальній зміні конструкції обладнання чи заміні матеріалів його основних вузлів, які сприймають найбільше навантаження, швидкості ковзання та температури.

Перший напрямок є більш ефективним у довгостроковій перспективі, однак до його недоліків слід віднести досить складну реалізацію пов'язану із використанням великої кількості людських ресурсів, енергетики тощо, а також досить суттєву витрату часу. Другий є ефективним у короткостроковій перспективі і потребує меншу кількість ресурсів і витрат часу. У даній роботі для підвищення надійності та довговічності машин і механізмів було обрано саме другий напрямок за яким запропоновано заміну матеріалів найбільш навантажених їх вузлів на розроблені нами.

Відомо, що полімери та композити на їх основі є найбільш перспективними матеріалами, використання яких дозволяє покращити роботу машин і механізмів. Для найбільш ефективного покращення необхідно підібрати полімерну основу із високим рівнем властивостей, досить часто це полімери спеціального призначення. Так, наприклад, для вузлів, що працюють при дії активних хімічних середовищ краще за все підійдуть фторполімери, для важковантажених вузлів слід використовувати ароматичні поліаміди, поліаміди, фенольні смоли тощо, для вузлів

тертя краще всього підходять матеріали на основі фторполімерів, ароматичних поліамідів, поліефірів тощо [130, 131].

До одного із найбільш затребуваних та розповсюджених полімерів серед матеріалів спеціального призначення слід віднести фторполімери. Це полімери на основі тетрафторетилену та його співполімерів, які мають у своєму полімерному ланцюгу групи $-\text{CF}_2-$. Фтополімери відрізняються унікальним рівнем хімічної стійкості. Вироби з них можуть працювати при дії концентрованих кислот, лугів тощо. Ці полімери підлягають розкладенню чи набухання тільки при дії деяких органічних розчинників та системи, яка складається із суміші концентрованих азотної і соляних кислот. Слід також відмітити досить високий рівень термічної стійкості фторполімерів. Деякі вироби з них можуть працювати при температурах до 450°C зберігаючи при цьому необхідний рівень експлуатаційних властивостей [30]. Також фторполімери є одними із найкращих полімерів, які можна використовувати у вузлах тертя машин і механізмів, зокрема важконавантажених, що працюють при мінімальному, граничному змащуванні чи без нього [132]. Орієнтовний рівень трибологічних властивостей полімерів при фрикційній взаємодії із сталлю приведено у таблиці 1.

До основних недоліків фторполімерів слід віднести відносно невисокий рівень фізико-механічних властивостей, що обмежує їх широке використання у важконавантажених вузлах тертя машин і механізмів.

Наповнення фторполімерів різними за природою, морфологією та властивостями матеріалами приводить до часткового покращення напруження при межі текучості та модуля пружності при стисканні, твердості, тепло- та термостійкості [29]. Однак таке підвищення не є досить суттєвим і у більшості випадків такі композити мають високу собівартість завдяки досить складній технології отримання виробів із них. Тому актуальним є питання створення полімерних композиційних матеріалів на основі фторполімерів із високим рівнем фізико-механічних та теплофізичних властивостей та невисокою собівартістю за рахунок використання ресурсозберігаючого методу переробки їх вихідних компонентів у вироби.

Таблиця 4 – Трибологічні властивості полімерів при фрикційній взаємодії із сталлю [134]

№ з/п	Полімери	Показник властивостей		
		Коефіцієнт тертя f	Зношування $I_h \times 10^{-9}$ м/м	Температура при терті
1	Фторполімери	0,15-0,30	900	110-150
2	Поліаміди	0,30-0,45	300	160-290
3	Фенольні та епоксидні смоли	0,35-0,45	600	220-250
4	Полііміди	0,20-0,40	270	160-300
5	Поліфінеленсульфід	0,15-0,30	-	220-250
6	Поліацетали	0,15-0,30	-	140-250

В якості фторполімерів було обрано матеріали із $-\text{CF}_2-$ елементами та їх замісниками у полімерному ланцюжку. Це такі полімери, як політертрафторетилен (ПТФЕ), кополімер тетрафторетилена з етиленом (КПТЕ) полівініліденфторид (ПВДФ). Дані матеріали є найбільш розповсюдженими із лінійки фторполімерів і завдяки своєму рівню властивостей закривають досить широкий спектр використання. Фізико-механічні та теплофізичні властивості фторполімерів приведені у таблиці 5.

Відповідно до приведених значень можна стверджувати що найкращий рівень фізико-механічних властивостей має фторполімер ПВДФ. Його напруження при межі текучості та модуль пружності при стисканні у 5 та 2 рази кращі ніж у ПТФЕ і на 25 та 30% мають більші значення ніж КПТЕ. За твердістю ПВДФ перевищує ПТФЕ та КПТЕ на 35 та 27% відповідно. При цьому температура розм'якшення за Віка, яка є мірою максимальної температури при якій можливо використовувати вироби із полімерів у вихідному вигляді (без суттєвої деформації при дії температури) для досліджених полімерів змінюється в інтервалі від 155 для КПТЕ

до 172 для ПТФЕ та ПВДФ. За термічною стійкістю, яка визначається температурою початку активної деструкції, полімерів найбільші значення має ПТФЕ – 417°C, що на 40°C та 55°C перевищує аналогічний параметр для КПТЕ та ПВДФ.

Таблиця 5 - Фізико-механічні та теплофізичні властивості фторполімерів

№ з/п	Показник властивостей	Значення		
		ПТФЕ	КПТЕ	ПВДФ
1	Густина ρ , кг/м ³	2160	1804	1850
2	Напруження при межі текучості при стисканні σ_y , МПа	12	44	59
3	Модуль пружності при стисканні E , МПа	610	940	1340
4	Твердість за Брінеллем H , МПа	42	48	66
5	Температура розм'якшення за Віка T_{VC} , °C	172	155	172
6	Температура початку активної деструкції, °C	427	370	380

Для покращення фізико-механічних та теплофізичних властивостей досліджених фторполімерів у їх склад вводили наповнювача на основі діоксиду кремнію марки силікагель. Вибір наповнювача та його уміст у фторполімерах був обраний відповідно до попередніх досліджень [29]. Де було встановлено, що полімерні композиційні матеріали із умістом силікагелю в області 8-12% ваг. мають найоптимальніший рівень фізико-механічних, теплофізичних та трибологічних властивостей. Тому для подальших досліджень було обрано середнє значення із цього інтервалу, а саме 10% уміст силікагелю в фторполімерах.

Фторполімери переробляються у вироби наступними методами [31]: спіканням, литтям під тиском, екструзією та компресійним пресуванням у формах із підігрівом.

Високопродуктивні методи лиття під тиском та екструзія, використовуються у більшості випадків для отримання виробів із фторполімерів на масових та серійних їх виробництвах, що є оптимальним з точки зору витрат та прибутків. Однак досить висока собівартість обладнання (литтєві машини та екструдери) та оснащення (литтєві форми, екструзійні головки тощо) до них обмежує використання таких методів переробки у вироби на одиничних виробництвах, що актуалізує використання відносно низькопродуктивних методів переробки фторполімерів у вироби, а саме спікання та компресійного пресування у формах із підігрівом [29]. У даній роботі для отримання виробів із фторполімерів використовували метод компресійного пресування у формах із підігрівом. Процес переробки виробів із фторполімерів складається із 3-х основних етапів: підготовчий, основний та завершальний.

На підготовчому етапі відбуваються операції підготовки вихідних компонентів полімерної композиції (просіювання, сушка, подрібнення тощо), їх суміщення та брикетування. При просіюванні та подрібненні відбувається руйнування агломератів вихідних компонентів фторполімерів чи композицій на їх основі із відбором необхідної фракції полімеру, наповнювачів тощо. Суміщення відбувається за допомогою механічних та фізико-хімічних методів для отримання полімерних композицій із високою якістю розподілення вихідних компонентів. При брикетуванні відбувається отримання суцільних брикетів із фторполімерів чи полімерних композицій на їх основі для покращення технологічності при переробці їх у вироби.

На основному етапі відбувається процес безпосередньої переробки фторполімерів у вироби з високоеластичного чи в'язкотекучього стану.

Завершальний етап складається із операцій придання отриманим виробам із фторполімерів необхідної (заданої у технічній документації) геометричної форми та шорсткості (видалення ливників, механічна обробка поверхонь тощо).

Відповідно до приведеного методу переробки фторполімерів та композитів на їх основі у вироби можна стверджувати, що він є досить складним та ресурсовитратним. Тому нами було розроблено новий ресурсозберігаючий метод переробки фторполімерів у вироби, відповідно до якого ми відмовляємося від операції механічного суміщення вихідних компонентів полімерних композицій на підготовчому етапі переробки та проводимо її під час синтезу наповнювача. Така методика *in situ* суміщення дозволяє спростити метод переробки композитів на основі фторполімерів у вироби отримуючи при цьому полімерні композиції із кращою якістю розподілення вихідних компонентів. Це, у свою чергу, робить його більш дешевим та дозволяє отримувати вироби із кращим рівнем властивостей. Більш докладно метод описано у попередній роботі [134].

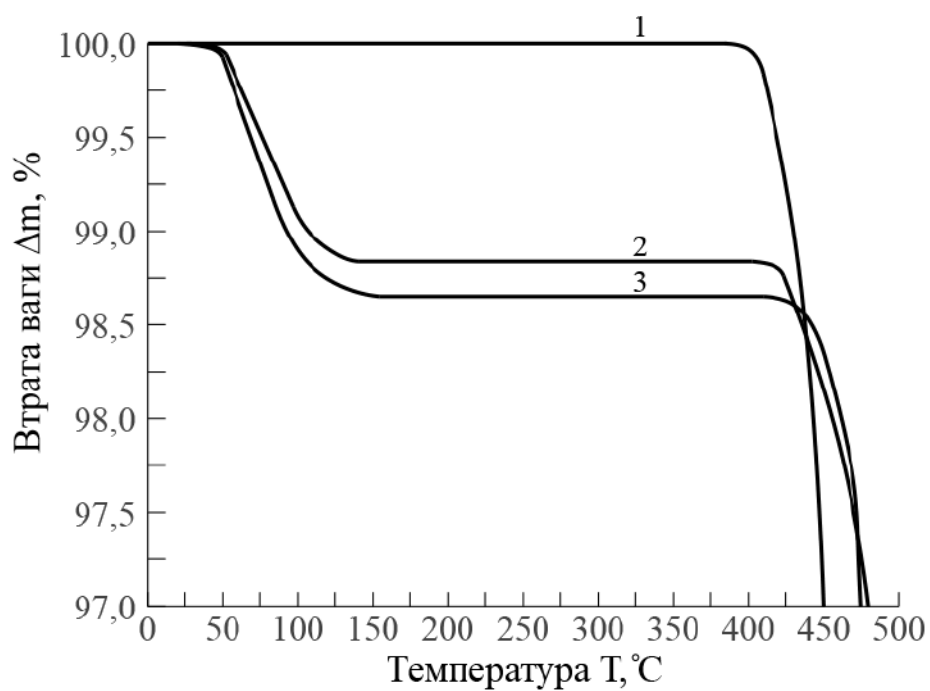
Відповідно до вищезазначеного нами було отримано полімерні композити на основі ПТФЕ, КПТЕ та ПВДФ, які наповнені 10% силікагелю і отримані за стандартною та розробленою нами методикою *in situ* суміщення вихідних компонентів полімерної композиції.

4.1 Теплофізичні властивості

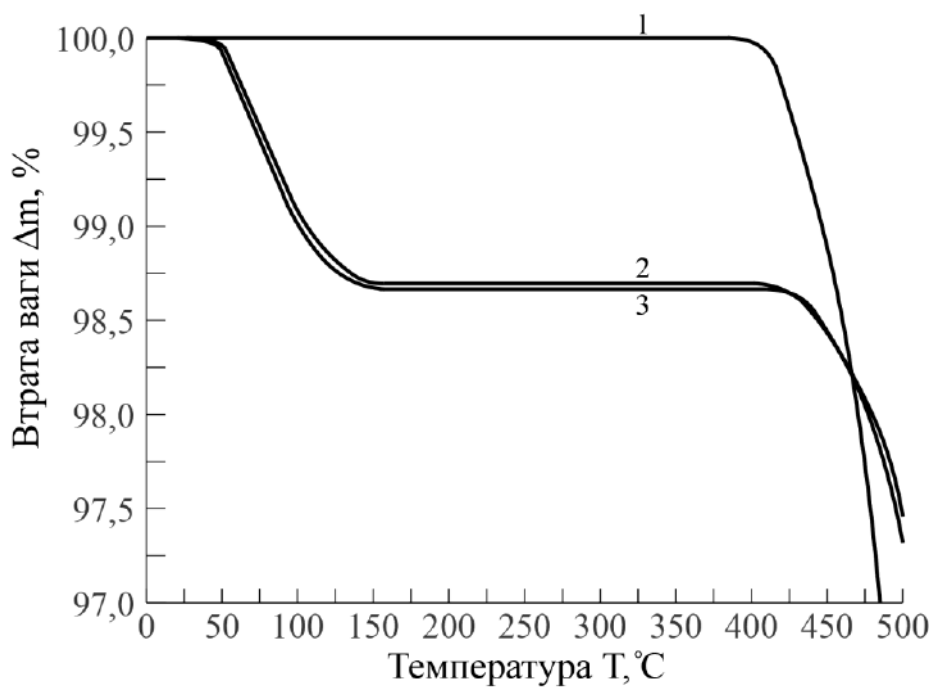
Для визначення граничних температур експлуатації виробів із розроблених полімерних композитів при яких відбувається їх термічне розкладення провели термогравіметричний аналіз вихідних фторполімерів та композитів на їх основі. Результати дослідження приведені на рисунку 44.

Відповідно до проведених досліджень можна стверджувати, що термогравіметричні криві вихідних фторполімерів мають подібний характер. Починаючи з температури досліджень 20-25°C до температур 435°C (для ПТФЕ), 370°C (для КПТЕ) та 380°C (для ПВДФ) спостерігається сталий характер термогравіметричних кривих без суттєвих змін, що свідчить про збереження хімічного складу фторполімерів. При більших температурах характер термогравіметричної кривої різко змінюється у сторону збільшення втрати ваги, що

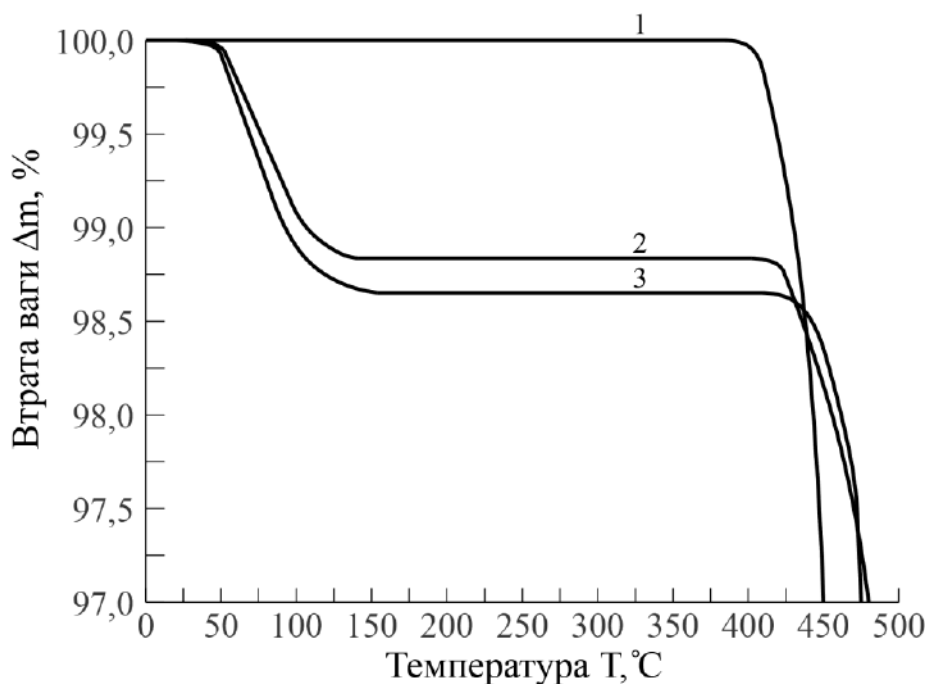
пояснюється початком активної деструкції макромолекул досліджених полімерів при дії на них теплової енергії.



а



б



в

Рисунок 44 – Термогравіметричний аналіз матеріалів на основі (а) ПТФЕ, (б) КПТЕ, (в) ПВДФ: 1 – вихідний фторполімер; 2,3 – композити 90% фторполімер + 10% силікагель, отримані за допомогою методу (2) механічного та (3) *in situ* суміщення вихідних компонентів полімерної композиції

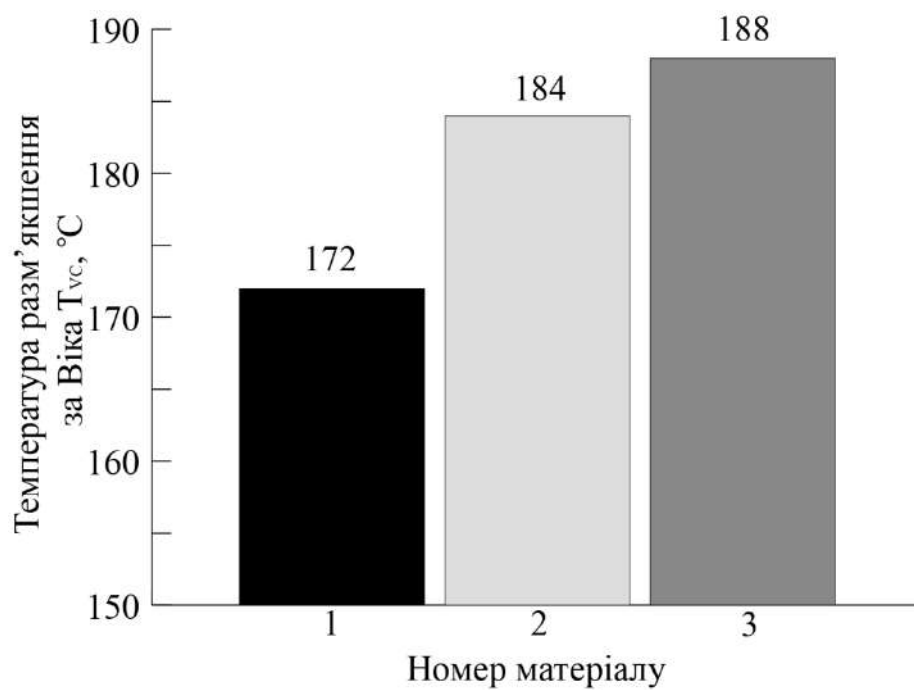
Характер термогравіметричних кривих композитів на основі фторполімерів має суттєві відмінності від вихідних полімерів. Так на них у області температур 50-70°C спостерігається різке падіння ваги зразка, яка стабілізується при температурах 150-160°C. Це пов'язано із випаровуванням із полімерного композиту вільної та зв'язаної води, яку не мають у своєму складі вихідні фторполімери. Наявність води у композитах є наслідком використання в якості наповнювача диоксиду кремнію силікагелю, який за рахунок розвиненої поверхні та активних силанольних груп на здатен поглинати до 10% води [99,135]. Після випаровування води характер термогравіметричних кривих знову стає сталим до температур 460-465°C (для композитів на основі ПТФЕ), 405-410°C (для композитів на основі КПТЕ) та 405-415°C (для композитів на основі ПВДФ). Із збільшенням температур знову спостерігається різка втрата ваги, яка є наслідком початку активної термічної деструкції композитів на основі фторполімерів. Слід звернути увагу, що

температури початку активної деструкції для полімерних композитів зміщуються у бік більших значень у порівнянні із вихідними фтор полімерами. При цьому збільшення температур початку активної деструкції спостерігається для всіх досліджених композитів, які отримані, як за методом механічного та і *in situ* суміщення. Так це збільшення складає для композитів на основі ПТФЕ – 30°C, КПТЕ – 40°C, ПВДФ – 35°C. Це збільшення пояснюється фізико-хімічною взаємодією силікагелю із молекулами фторполімерів. Яка, мабуть, обумовлена адгезійною взаємодією та створенням водневих зв'язків між поверхнею наповнювача і молекулами полімерів.

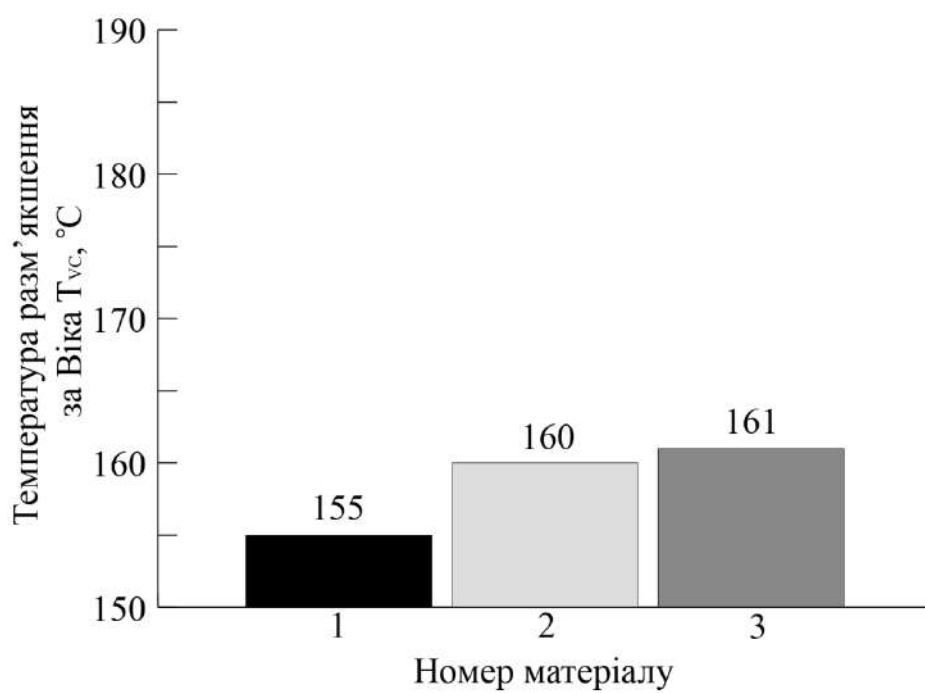
Порівнюючи результати термогравіметричних досліджень композиційних матеріалів, які отримані за допомогою різних методів суміщення вихідних компонентів полімерних композицій можна зробити висновок, що температура початку активної деструкції у матеріалів, отриманих за *in situ* суміщенням на 10-15°C перевищує аналогічний параметр для композитів, отриманих за механічним методом. Це пояснюється кращим рівнем розподілу дрібнодисперсного наповнювача силікагелю у фторполімерах при отриманні композитів за допомогою методу *in situ* суміщення вихідних компонентів полімерної композиції [134].

Для визначення граничної температури роботи виробів із вихідних фторполімерів та композитів на їх основі провели дослідження їх теплостійкості, яка визначається за температурою розм'якшення за Віка. Результати досліджень приведені на рисунку 45.

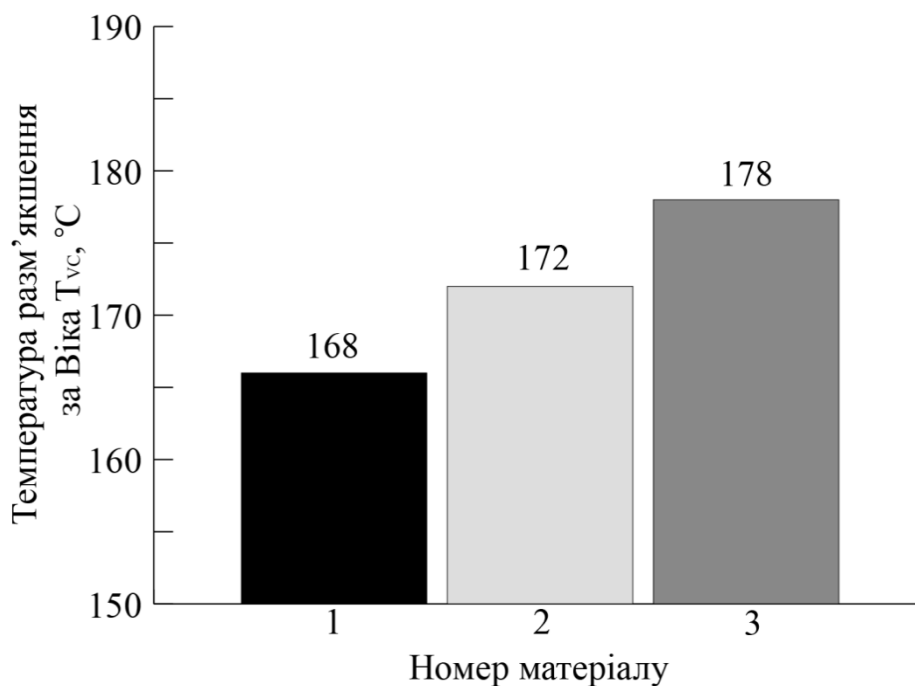
Відповідно до приведених результатів досліджень температура розм'якшення за Віка вихідних фторполімерів знаходиться у межах від 155-172°C. При цьому значення цього параметру для ПТФЕ дорівнює 172, для КПТЕ – 155 і для ПВДФ 168°C. Додавання силікагелю у склад досліджених фторполімерів дозволяє покращити цей параметр на 6-16°C в залежності від складу композиту. Це відбувається в наслідок взаємодії полімерних молекул із наповнювачем силікагелем у результаті якого відбувається обмеження їх рухомості при термічній дії.



а



б



в

Рисунок 45 – Температура розм'якшення за Віка матеріалів на основі (а) ПТФЕ, (б) КПТЕ, (в) ПВДФ: 1 – вихідний фторполімер; 2,3 – композити 90% фторполімер + 10% силікагель, отримані за допомогою методу (2) механічного та (3) *in situ* суміщення вихідних компонентів полімерної композиції

Слід звернути увагу на те, що матеріали, отримані за *in situ* суміщенням вихідних компонентів полімерних композицій мають кращі значення температури розм'якшення за Віка ніж аналогічні за складом, отримані за механічним методом суміщення. Це покращення дорівнює від 1 до 6°C в залежності від складу композитів і є наслідком кращої якості розподілення наповнювача в об'ємі полімеру при отриманні полімерних композицій за методом *in situ* суміщення їх вихідних компонентів.

Відповідно до проведених теплофізичних досліджень вихідних фторполімерів та композитів на їх основі можна стверджувати, що введення у їх склад дрібнодисперсного наповнювача силікагелю дозволяє покращити рівень їх термічної стійкості на 30-40°C та теплостійкості на 6-16°C, що є наслідком фізико-хімічної взаємодії силікагелю із дослідженими фторполімерами. А кращий рівень теплофізичних властивостей у композитів, отриманих за методом *in situ* суміщення

вихідних компонентів у порівнянні із матеріалами отриманими за механічним методом пов'язаний із кращою якістю розподілення наповнювача у об'ємі фторполімерів.

4.2 Фізико-механічні властивості

Уявляє зацікавленість дослідити фізико-механічні властивості розроблених композитів на основі фторполімерів. До одних із найважливіших фізико-механічних властивостей полімерних композитів слід віднести їх густину, твердість, напруження при межі текучості та модуль пружності при стисканні. Усі ці характеристики залежать як від складу полімерного композиту, так від методу його переробки у вироби і практично у повній мірі характеризують міцнісні властивості деталей, які будуть створені із розроблених полімерних композитів. У таблиці 6 приведені результати таких досліджень.

Таблиця 6 – Фізико-механічні властивості композитів на основі фторполімерів

№ з/п	Показник властивостей	Значення					
		90% ПТФЕ + 10% силікагель		90% КПТЕ + 10% силікагель		90% ПВДФ + 10% силікагель	
		мех	in situ	мех	in situ	мех	in situ
1	Густина ρ , кг/м ³	2150	2135	1841	1680	1911	1935
2	Напруження при межі текучості при стисканні σ_y , МПа	21	26	64	49	73	89
3	Модуль пружності при стисканні E , МПа	680	790	1200	980	1680	1890
4	Твердість за Брінеллем НВ, МПа	50,7	52,1	69,3	50,2	86,0	100,0

Відповідно до отриманих результатів досліджень можна побачити, що введення у склад фторполімерів силікагелю (таблиця 6) призводить до зміни густини. Для композитів на основі ПТФЕ спостерігається незначне зменшення густини з 2160 до 2135 г/см³, а для фторполімерів на основі КПТЕ та ПВДФ введення силікагелю призводить до деякого підвищення цього параметру з 1800 до 1950 кг/м³. Це відбувається внаслідок суміщення різних за густинами компонентів (полімерна основа та наповнювач) полімерних композицій. Слід зазначити, що густина силікагелю лежить в інтервалі від 2000 до 2200 кг/м³. Порівнюючи значення густини композитів, які отримані за різними методами переробки можна стверджувати, що у композитів на основі ПТФЕ різниця між значеннями густину матеріалів, отриманими за різними методиками не значна і лежить у області помилки. Композити а основі КПТЕ, отримані за механічним методом мають більшу густину, ніж ті, що отримані за методом *in situ* суміщення вихідних компонентів полімерної композиції. Це пов'язано із складнощами розподілу частинок КТФЕ у реакційному середовищі при синтезі силікагелю, коли, навіть при інтенсивному перемішуванні, неможливо було отримати суспензію із рівномірно розподіленими частинками твердої речовини (полімер не тонує і знаходився на поверхні водяного розчину силікату натрію). На відміну від попереднього фторполімеру матеріали на основі ПВДФ мають значне підвищення густини при використанні методу *in situ* суміщення вихідних компонентів полімерних композицій у порівнянні із механічно суміщеними. Що є наслідком зміни структури полімерного композиту у зв'язку із покращенням якості розподілу дрібнодисперсного наповнювача у об'ємі фторполімеру [134].

Зміна значень густини розроблених композитів свідчить про зміну їх структури та відповідно до цього і рівня властивостей. І дійсно значення напруження при межі текучості, модуля пружності при стисканні та твердості досліджених матеріалів чітко корелюють із їхньою густиною. Додавання у фторполімери силікагелю дозволяє збільшити їх на 25-55% для композиту на основі ПТФЕ, 25-30% для матеріалу на основі КПТЕ та на 30-35% для композиту із ПВДФ

в залежності від властивостей, що вивчалися. Це є свідченням фізико-хімічної дії наповнювача на полімерну матрицю за рахунок адгезійної взаємодії та виникнення водневиз зв'язків. При порівнянні композитів отриманих за різними методиками суміщення вихідних компонентів можна стверджувати, що для матеріалів на основі ПТФЕ та ПВДФ ті, що отримані за допомогою *in situ* суміщення вихідних компонентів спостерігаються кращі значення фізико-механічних властивостей, які на 10-20% перевищують матеріали отримані за механічним методом. Що є свідченням кращої якості розподілення силікагелю в об'ємі досліджених фторполімерів. У композитів на основі КПТЕ спостерігається інша закономірність. Для них матеріали отримані за механічним методом мають на 20-25% кращий рівень напруження при межі текучості, модуля пружності при стисканні та твердості ніж ті, що отримані за *in situ* суміщенням. Це чітко корелює із значеннями густини даних матеріалів і пояснюється низькою якістю розподілення силікагелю в об'ємі полімеру, яка пов'язана із складністю рівномірно розподілити частинки фтор полімеру КПТЕ у реакційному середовищі при синтезі силікагелю.

РОЗДІЛ 5

ВИЗНАЧЕННЯ ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОЗРОБЛЕНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

Сучасні машини і механізми працюють при дії високого рівня навантажень, швидкостей ковзання та температур. Це пов'язано із поступовим збільшенням їх продуктивності для задоволення постійно зростаючих потреб людства. Починаючи із зародження людини і по теперішній час люди постійно розширюють асортимент та кількість товарів, які вони споживають для створення яких необхідно використовувати більші потужності виробництв. Можливі шляхи збільшення продуктивності виробництв зображені на схемі (рисунок 46).



Рисунок 46 – Шляхи збільшення продуктивності виробництв

Кожні з цих шляхів мають свої переваги та недоліки. Так збільшення кількості обладнання на підприємствах дозволяє підвищити кількість продукції що виробляється, як у довгостроковій та і короткостроковій перспективі. Однак для впровадження даного шляху необхідно досить значні капіталовкладення, які будуть використовуватися не тільки на закупівлю нового обладнання та на організацію робочих місць, а і також на підготовку кваліфікованих спеціалістів, які з цим обладнанням будуть працювати. Збільшення інтенсивності роботи вже існуючого обладнання є найбільш ефективним шляхом, який можна впровадити у короткостроковій перспективі. Це дозволить підвищити продуктивність вже існуючого обладнання та не потребує значних капіталовкладень, але призводить до

значного зменшення його надійності та довговічності у роботі. Створення кардинально нового за принципом роботи обладнання є найбільш перспективним шляхом у довгостроковій перспективі. Однак кількість капіталовкладень та людських ресурсів, що використовуються для цього є непомірними у порівнянні із попередніми двома шляхами вирішення проблеми збільшення продуктивності виробництва.

Зважаючи на вищезазначене, на наш погляд, найбільш перспективним є варіант із збільшенням продуктивності виробництва за рахунок збільшення продуктивності наявного обладнання. А проблему зменшення його надійності та довговічності у роботі можна вирішити за рахунок нескладної модернізації їх вузлів та деталей, які частіше всього виходять з ладу.

До такої модернізації слід віднести заміну деталей, що труться у вузлах тертя машин і механізмів на розроблені нами матеріали із кращим рівнем властивостей ніж ті, що використовуються зараз.

Відповідно до попередніх розділів в якості таких матеріалів було обрано фторполімери, які наповнені дрібнодисперсним діоксидом кремнію та створені за стандартною та *in situ* технологіями суміщення вихідних компонентів полімерних композицій. Відповідно до попередніх досліджень [78, 97, 136] встановлено, що введення диоксиду кремнію силікагелю у полімери сприяє покращенню їх трибологічних властивостей. Тому використання такого наповнювача для полімерів, які працюють у вузлах тертя є виправданим.

5.1 Вибір режимів притирання розроблених композитів

При дослідженні матеріалів для вузлів тертя досить важливим є визначення шляху чи часу, які необхідні для їх притирання. Це обумовлено тим, що у початковий період при фрикційній взаємодії вихідні поверхні тертя починають інтенсивно руйнуватися до настання стану рівновісної шорсткості (шорсткості поверхонь, що вступають у фрикційну взаємодію у результаті тертя та зношування зрівнюються за морфологією) [137]. Після цього інтенсивне початкове зношування

поверхонь, що труться припиняється і вузол тертя переходить у нормальний режим роботи, коли зростання зношування та тертя від шляху проходить за лінійною залежністю [138]. Відповідно до того, що більшість вузлів тертя працюють у нормальному режимі роботи (після притирання), то і дослідження трибологічних властивостей розроблених полімерних композитів необхідно проводити не враховуючи режим їх притирання по сталі. Для цього необхідно визначити шлях ковзання за який притирають досліджувані пари тертя. Це можна зробити за допомогою прямого вимірювання шорсткості поверхонь тертя впродовж шляху ковзання пари тертя. Однак така методика досить складана, не досить точна та займає багато часу. Тому нами було обрано інший підхід до визначення шляху притирання за допомогою вимірювання температури при терті. Відповідно до графіку зміни температури пари тертя від часу тертя (рисунок 47) на початковому етапі тертя (I – період притирання) відбувається зростання температури, що пов'язано із інтенсивним притиранням поверхонь при фрикційній взаємодії. В подальшому настає період нормальної роботи пари тертя, який характеризується настанням рівновісної шорсткості та стабілізацією температури на поверхні тертя. III-й період роботи є аварійним при якому спостерігається інтенсивний підйом температури на поверхні тертя внаслідок її швидкого зношування, який призведе до руйнування пари тертя із його подальшим заклинюванням та виходом із ладу.



Рисунок 47 – Залежність температури при терті від часу тертя [141]

Тому для визначення часу притирання розроблених полімерних композитів при фрикційній взаємодії із сталлю нами були проведені дослідження зміни температури на поверхні тертя від часу тертя. При цьому пара тертя навантажувалася $P = 0,75$ МПа і працювала при швидкості ковзання $0,75$ м/с. Результати досліджень зображені на рисунках 48-50.

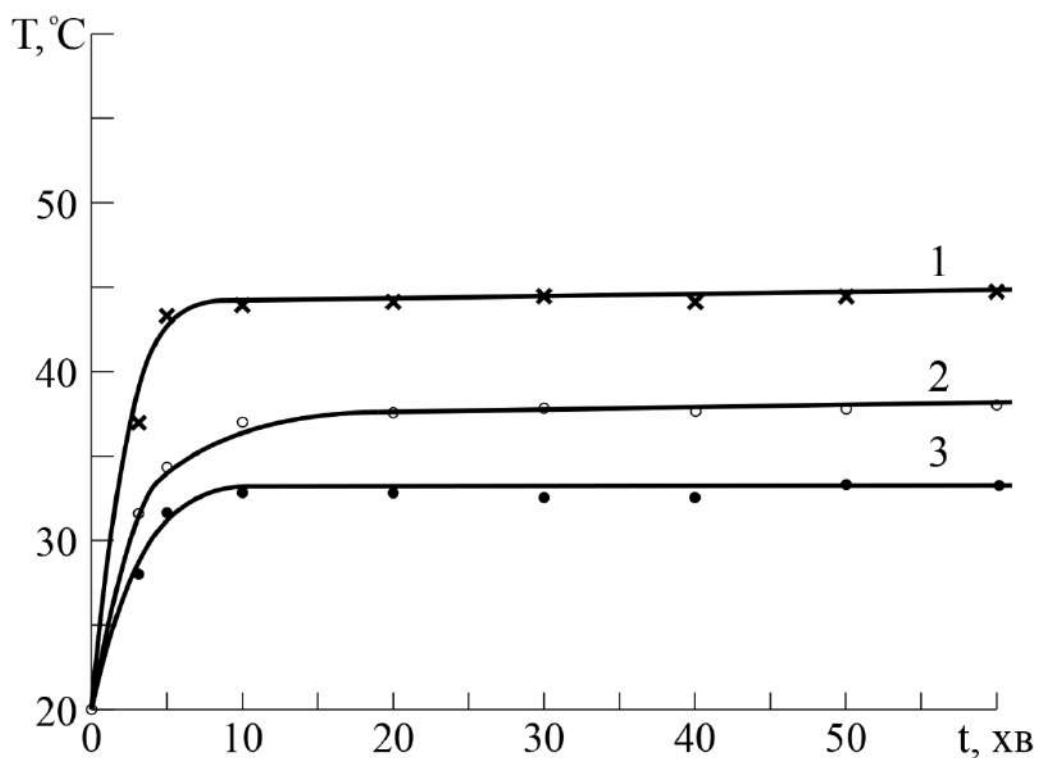


Рисунок 48 - Залежності температури на поверхні тертя (T) від часу тертя (t) для вихідного ПТФЕ (1) та композитів на його основі, які наповнених 10% силікагелю та отриманих за (2) механічним та (3) *in situ* способами суміщення вихідних компонентів полімерних композицій

Відповідно до рисунку 3 можна стверджувати, що із збільшенням часу тертя збільшується температура на поверхні тертя. Причому у початковий період тертя з 0 до 8-10 хвилин спостерігається більш інтенсивне збільшення температури ніж у подальшому, коли температура стабілізується і незначно зростає із збільшенням часу тертя. При цьому початковий етап із інтенсивним ростом температури і є періодом притирання досліджених пар тертя, а подальша стабілізація температури свідчить про перехід до нормального режиму тертя. Відповідно до приведених результатів (рисунок 50) для всіх досліджених матеріалів на основі ПТФЕ період притирання закінчується на 8-10 хвилині. Тобто подальші трибологічні дослідження цих матеріалів будемо проводити із урахуванням цього.

Аналогічні дослідження були проведені для матеріалів на основі КПТЕ. Їх результати приведені на рисунку 49.

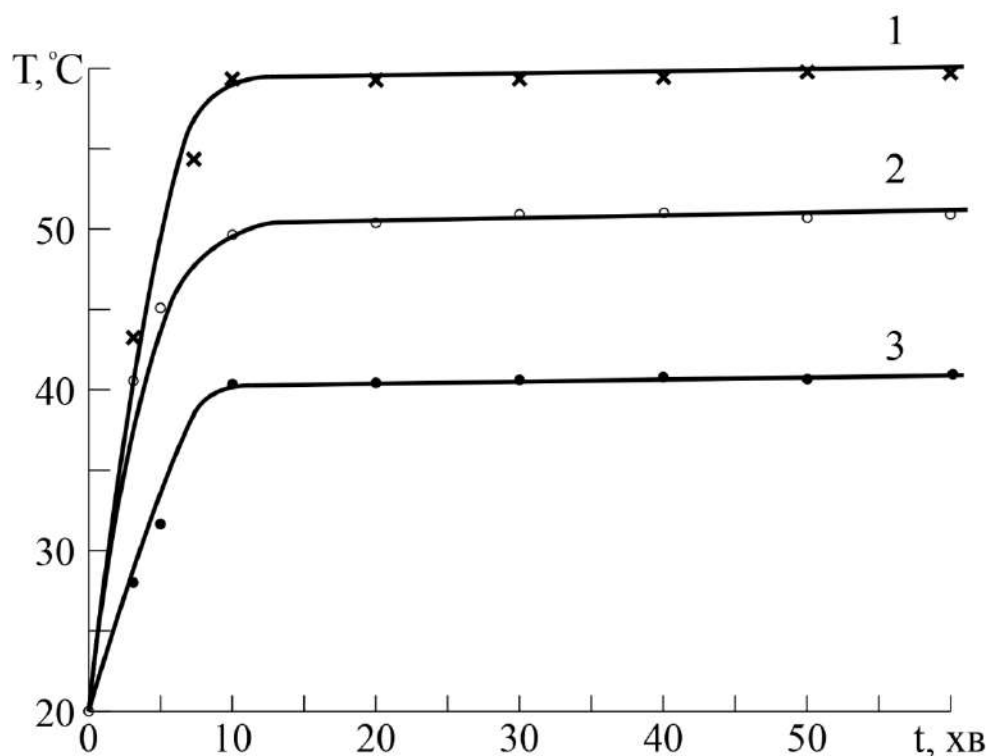


Рисунок 49 - Залежності температури на поверхні тертя (T) від часу тертя (t) для вихідного КПТЕ (1) та композитів на його основі, які наповнених 10% силікагелю та отриманих за (2) механічним та (3) *in situ* способами суміщення вихідних компонентів полімерних композицій

Результати досліджень аналогічні із тими, що отримані для матеріалу на основі ПТФЕ. На початковому етапі тертя спостерігається різке збільшення температури впродовж перших 8-10 хвилин із подальшою її стабілізацією. Тобто період притирання матеріалів на основі КПТЕ лежить в інтервалі 8-10 хвилин при заданих навантаженнях та швидкостях ковзання, що практично збігається з аналогічними результатами для матеріалів на основі ПТФЕ.

Нами також були проведені дослідження залежностей температури на поверхні тертя від часу тертя для матеріалів на основі ПВДФ (рисунок 50).

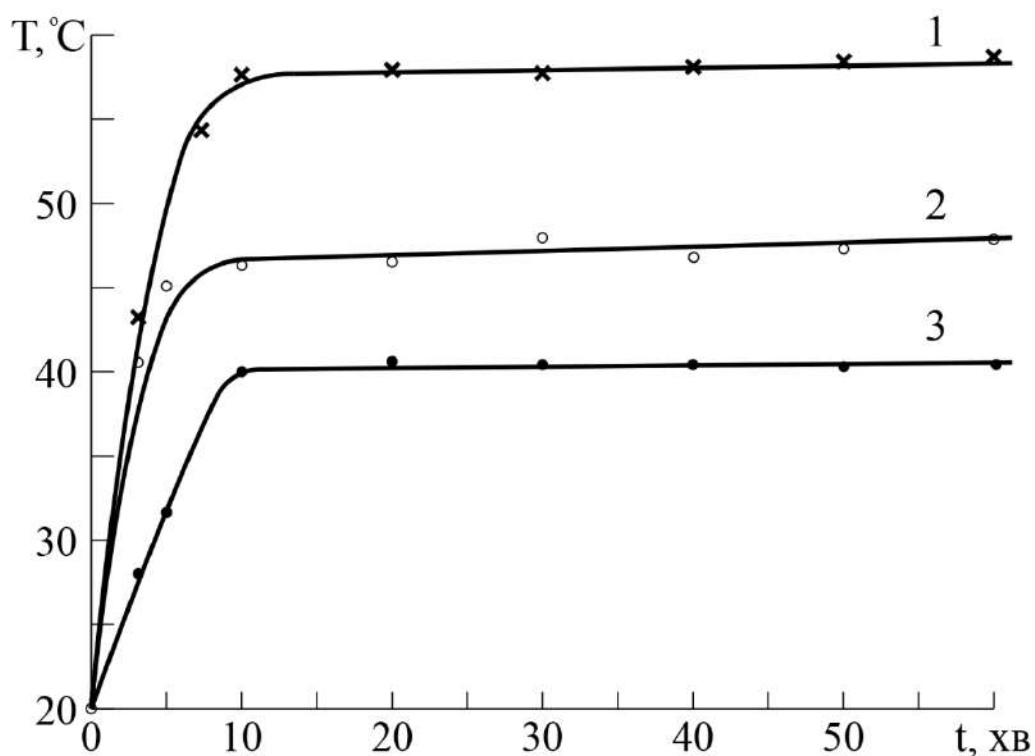


Рисунок 50 - Залежності температури на поверхні тертя (T) від часу тертя (t) для вихідного ПВДФ (1) та композитів на його основі, які наповнених 10% силікагелю та отриманих за (2) механічним та (3) *in situ* способами суміщення вихідних компонентів полімерних композицій

Для досліджених матеріалів на основі ПВДФ значення температури на поверхні тертя у початковий період фрикційної взаємодії 8-10 хвилин інтенсивно зростають і після цього стабілізуються і практично не змінюються впродовж всього дослідженого часу тертя. Для цих матеріалів період притирання відповідає часу 8-10 хвилин.

Відповідно до проведених досліджень щодо визначення часу притирання досліджених пар тертя при навантаженні $P = 0,75$ МПа і швидкості ковзання $0,75$ м/с встановлено, що пари тертя на основі фторполімерів необхідно притирати впродовж 10 хвилин і вже після цього починати їх трибологічні дослідження.

5.2 Температура на поверхні тертя

Одним із найбільш головних трибологічних показників, який опосередковано вказує на якість роботи пари тертя є температура на поверхні тертя. Її значення залежать від багатьох зовнішніх (навантаження, швидкість ковзання, волога, схема тертя, режим тертя тощо) та внутрішніх (матеріали, що труться, конструкція вузла тертя тощо) факторів [139, 140]. У більшості вузлів тертя антифрикційного призначення при менших значеннях температури на поверхні тертя спостерігається їх більш надійна та довговічна робота. Тому використання даного параметру для оцінки працездатності вузлів тертя є досить актуальним. Результати досліджень температури на поверхні тертя для фтор полімерів та розроблених композитів на їх основі зображені на рисунку 51, 52, 53.

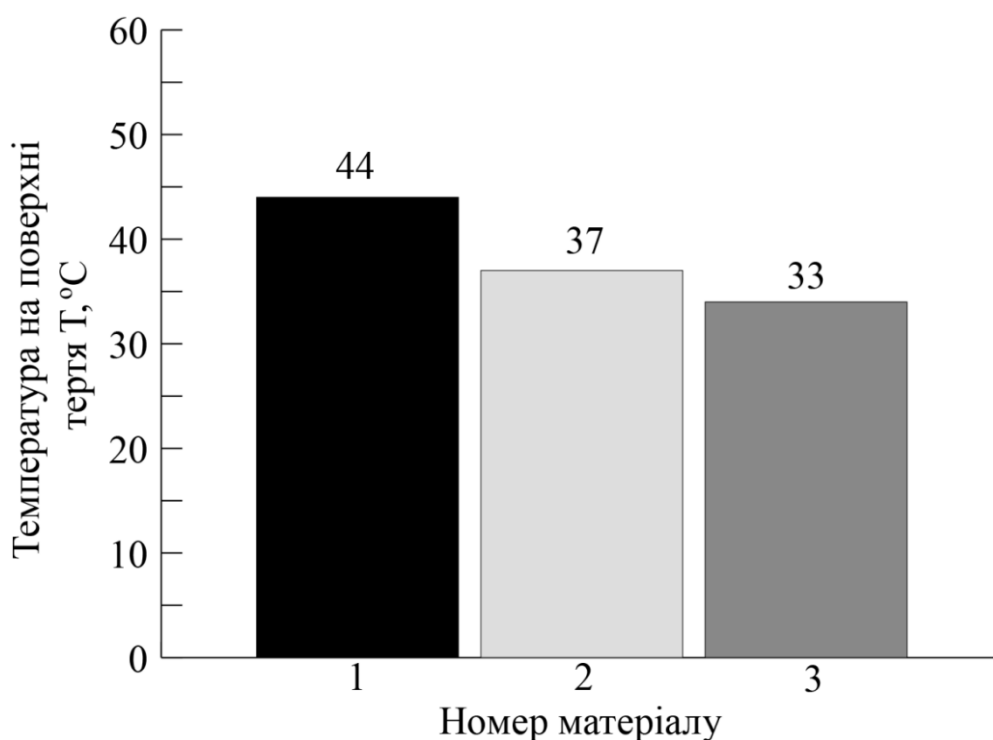


Рисунок 51 - Значення температури на поверхні тертя (T) для вихідного ПТФЕ (1) та композитів на його основі, які наповнені 10% силікагелю та отримані за (2) механічним та (3) *in situ* способами суміщення вихідних компонентів полімерних композицій

Відповідно до результатів приведених на рисунку 5 температури на поверхні тертя розроблених композитів на 7-11°C мають менші значення ніж при терті вихідного ПТФЕ. Це є свідченням зміни характеру тертя при додаванні у полімерну матрицю силікагелю. При цьому композити, які отримані за *in situ* способом суміщення вихідних компонентів полімерної композиції мають менші значення температури при терті ніж ті, що отримані за механічним способом. Це, скоріш за все, пояснюється зміною структури полімерного елементу вузла тертя та кращою якістю розподілу наповнювача у його об'ємі, що сприяє більш якісному відведенню тепла від зони тертя.

При терті КТПЕ та композитів на його основі спостерігається подібна до попередніх досліджень картина (рисунок 53). Так введення силікагелю приводить до зменшення температури на поверхні тертя для всіх розглянутих композитів.

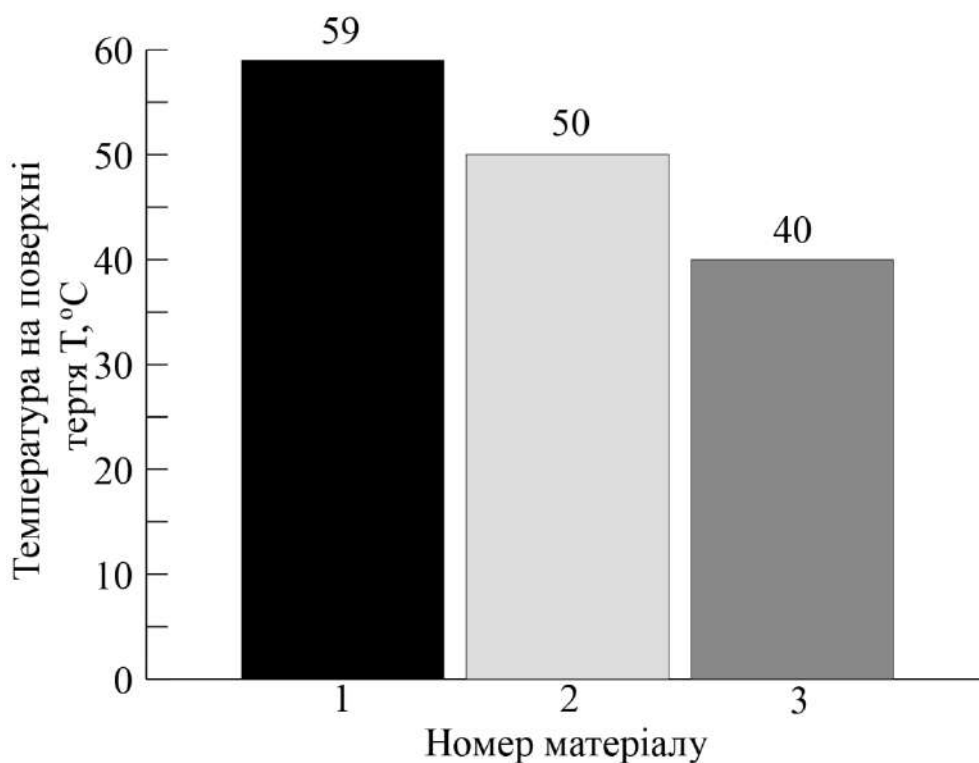


Рисунок 52 - Значення температури на поверхні тертя (T) для вихідного КТПЕ (1) та композитів на його основі, які наповнені 10% силікагелю та отримані за (2) механічним та (3) *in situ* способами суміщення вихідних компонентів полімерних композицій

Для вихідного КТПЕ температура на поверхні тертя дорівнює 59°C, що на 9 та 19°C перевищує значення температури при терті композитів на його основі при їх фрикційній взаємодії із сталлю.

Значення температур при терті ПВДФ та композитів на їх основі практично дорівнюють аналогічним, які характерні для матеріалів на основі КТПЕ, що свідчить про схожість їх структури і підтверджується структурними схемами молекул полімерів.

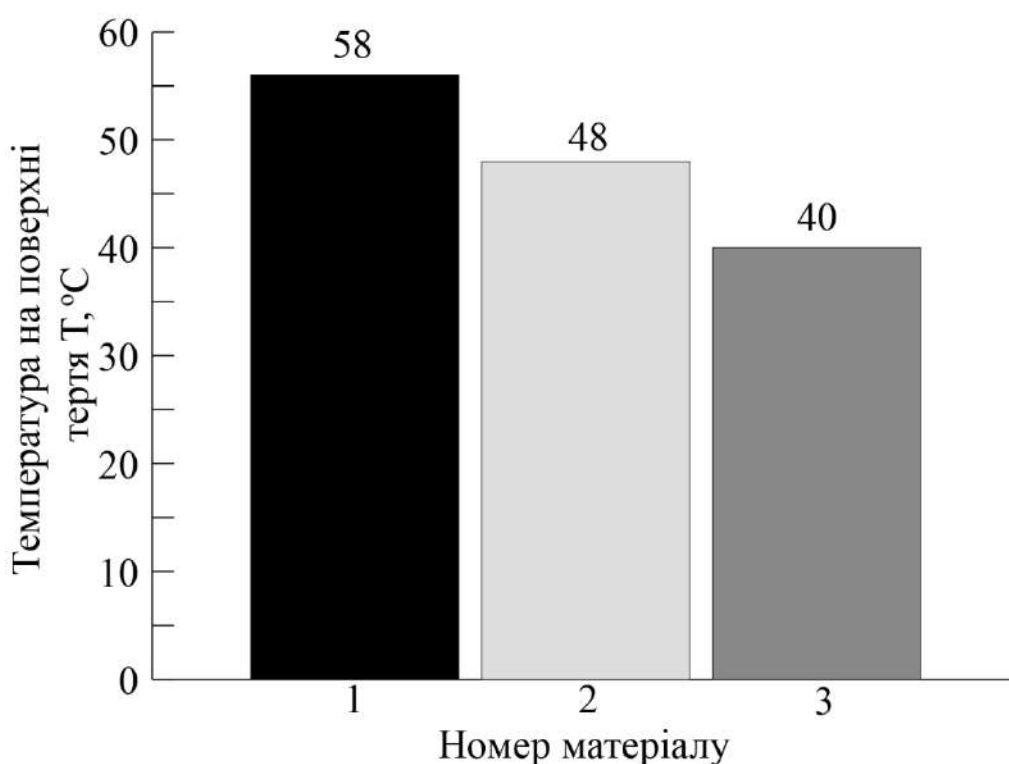


Рисунок 53 - Значення температури на поверхні тертя (Т) для вихідного ПВДФ (1) та композитів на його основі, які наповнені 10% силікагелю та отримані за (2) механічним та (3) *in situ* способами суміщення вихідних компонентів полімерних композицій

Так для вихідного ПВДФ температура на поверхні тертя при його фрикційній взаємодії із сталлю дорівнює 58°C, що на 10 та 18°C більше ніж для композитів на його основі. При цьому слід зазначити, що композит, отриманий за *in situ* способом суміщення вихідних компонентів полімерної композиції має менші значення

температури при терті по сталі, що характерно для всіх попередньо досліджених матеріалів і пояснюється зміною його структури та кращою якістю розподілу наповнювача у об'ємі полімеру.

5.3 Коефіцієнт тертя та інтенсивність лінійного зношування

До основних трибологічних властивостей матеріалів вузлів тертя при їх фрикційній взаємодії із сталлю слід віднести коефіцієнт тертя та зносостійкість. Коефіцієнт тертя є характеристикою, яка показує значення сили тертя, що виникає у фрикційній парі тертя з урахуванням нормального навантаження. Для антифрикційних вузлів тертя менші значення коефіцієнта тертя є пріоритетним. Зносостійкість якісно та кількісно показує супротив матеріалу зношуванню при терті по іншій поверхні (у нашому випадку по сталі). Зносостійкість визначається за допомогою вагового чи лінійного зношування, які справедливі для трибологічних досліджень матеріалів на однаковій основі. Вони не враховують густину досліджуваних матеріалів і тому порівняння зношування деталей вузлів тертя на основі різних матеріалів не є правильним. Тому загальноприйнятою величиною оцінювання зношування є інтенсивність лінійного зношування (I_h). Ця величина враховує, як безпосереднє зношування (лінійне чи вагове), так і густину матеріалів, що досліджуються. І при терті циліндричного зразка по сталевому контртілу інтенсивність лінійного зношування розраховується за формулою:

$$I_h = \frac{4m}{\pi \cdot d^2 \cdot \rho} / L \quad 1$$

m – вагове зношування, гр;

π – число ПІ;

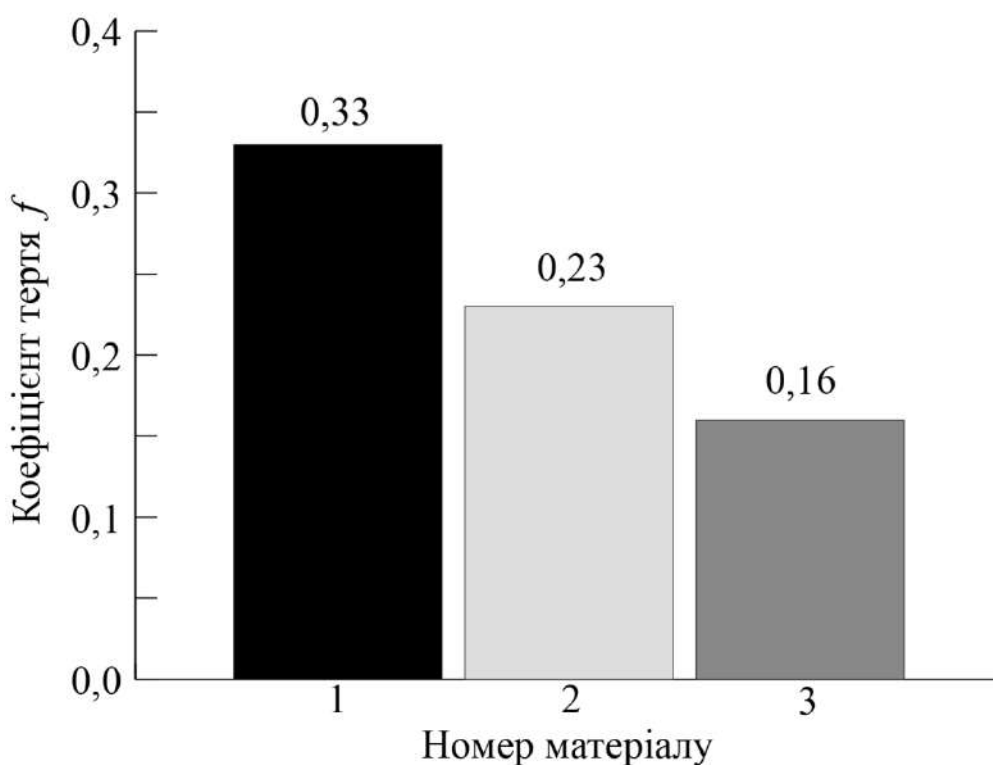
d – діаметр зразка, см;

ρ – густина зразка, гр/см³;

L – шлях ковзання.

Для усього із розроблених матеріалів провели дослідження щодо визначення коефіцієнту тертя та інтенсивності лінійного зношування при навантаженні 0,75 МПа та швидкості ковзання 0,75 м/с у режимі тертя без змащування. Результати приведені на рисунку 9, 11, 12.

Відповідно до приведених результатів (рисунк 54) досліджень можна зробити висновок, що розроблені композити на основі ПТФЕ мають на 30-50% та 7-10 разів менші значення коефіцієнта тертя і інтенсивність лінійного зношування відповідно у порівнянні із вихідним полімером. Покращення рівня трибологічних властивостей композитів пов'язано із зміною їх структури та міцнісних властивостей при додаванні у ПТФЕ дрібнодисперсного силікагелю. І також зміною характеру тертя при фрикційній взаємодії полімерних композитів із сталлю у порівнянні із вихідним ПТФЕ.



а

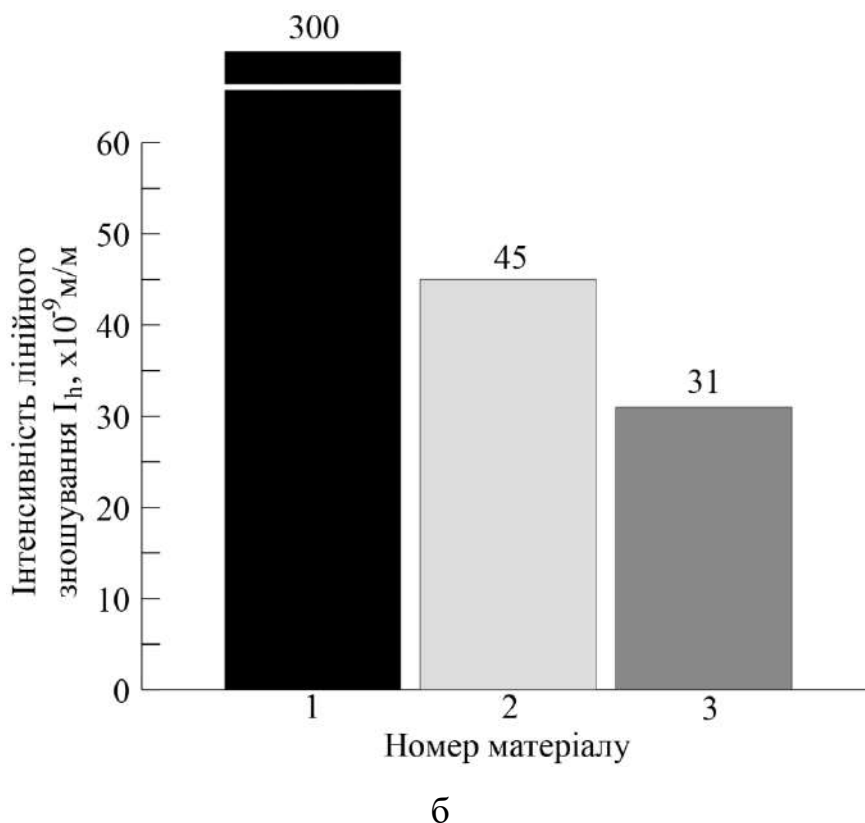
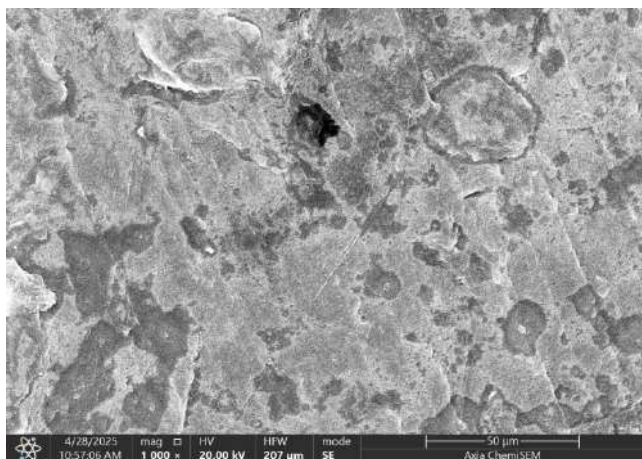
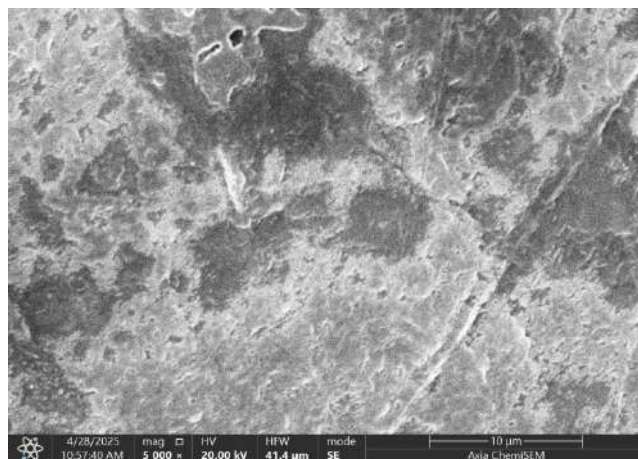


Рисунок 54 – Значення (а) коефіцієнта тертя (f) та (б) інтенсивності лінійного зношування (I_h) для вихідного ПТФЕ (1) та композитів на його основі, які наповнені 10% силікагелю та отримані за (2) механічним та (3) *in situ* способами суміщення вихідних компонентів полімерних композицій

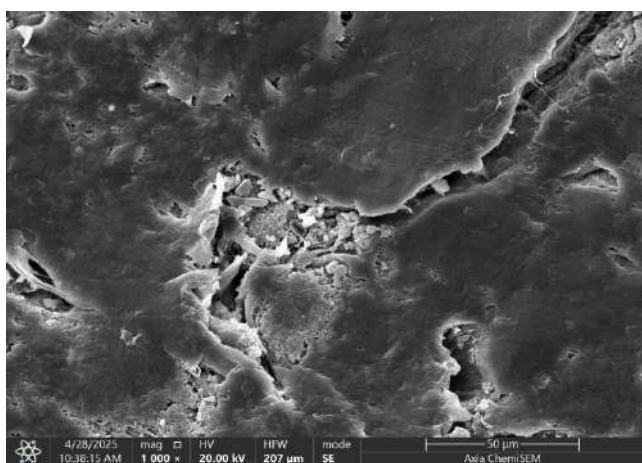
Слід звернути увагу, що матеріали, отримані за *in situ* методом суміщення вихідних компонентів полімерних композицій мають кращі значення трибологічних властивостей, ніж ті, що отримані за механічним. Це пояснюється з одного боку кращим розподіленням силікагелю у об'ємі ПТФЕ (див. розділ 3) так і зменшенням розмірів агломератів наповнювача у полімерній композиції. Для підтвердження цього припущення були отримані мікрофотографії сколів полімерних композитів, отриманих за механічним (стандартним) та *in situ* способами суміщення вихідних компонентів полімерних композицій (рисунок 55).



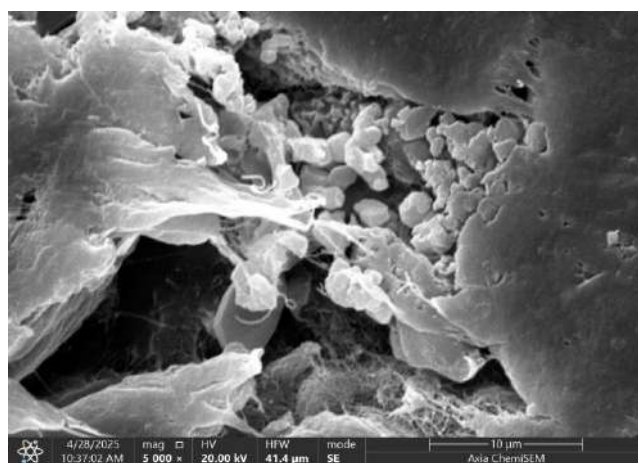
А



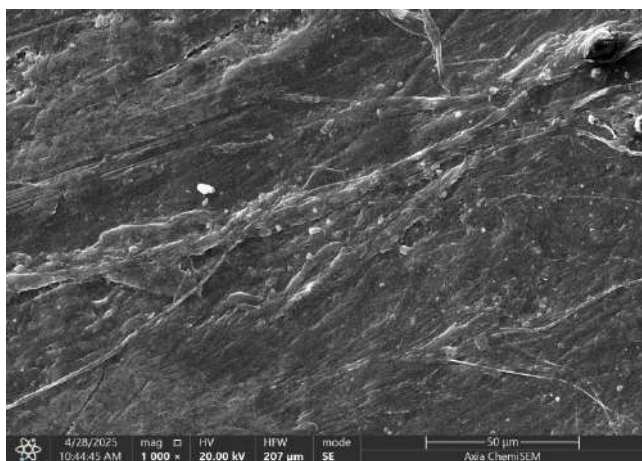
Б



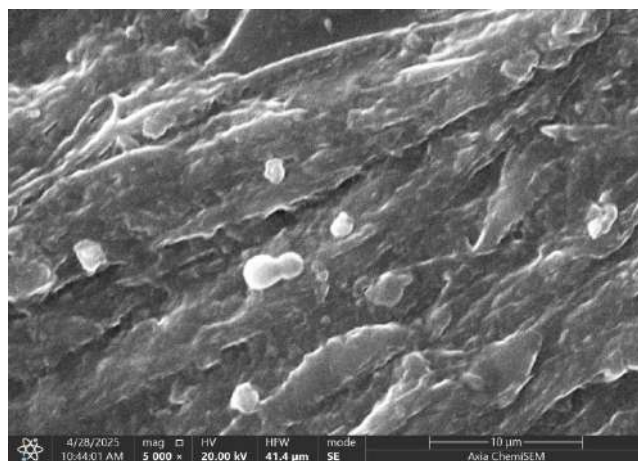
В



Г



Д



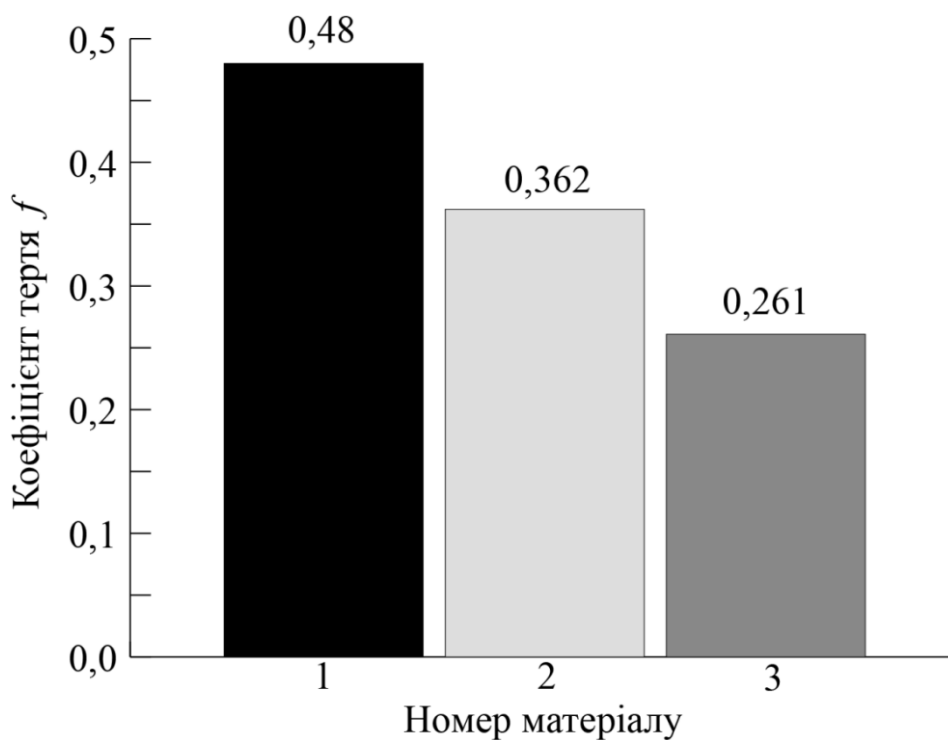
Е

Рисунок 55 - Мікрофотографії поверхонь сколів із вихідного ПТФЕ (а,б) та композитів на його основі, які наповнені 10% силікагелю та отримані за (в,г) механічним та (д,е) in situ способами суміщення вихідних компонентів полімерних композицій

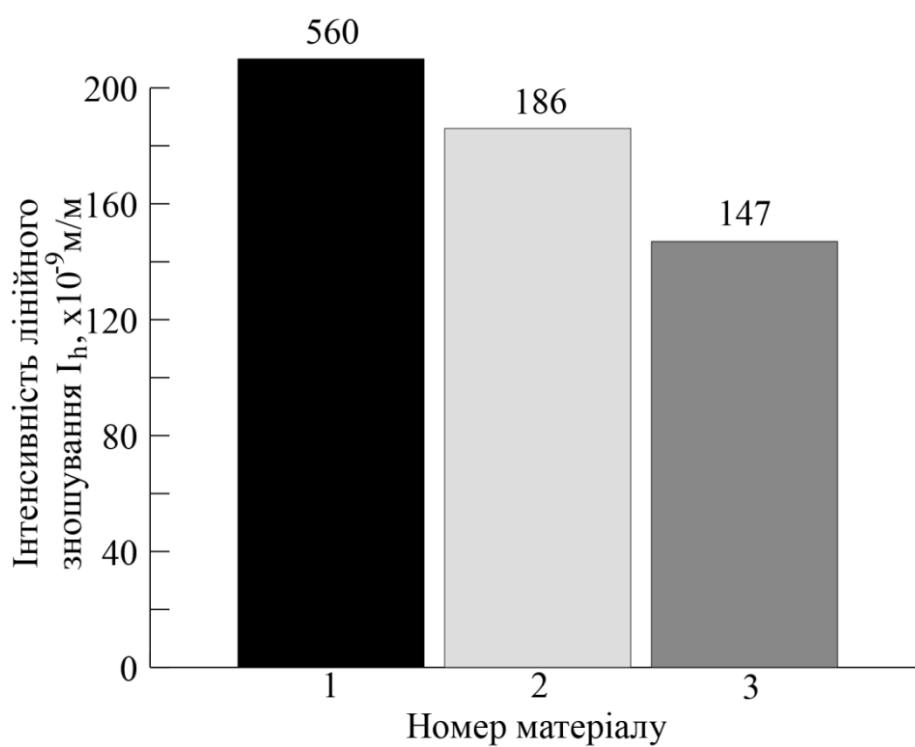
Відповідно до фотографій поверхня сколу вихідного ПТФЕ має практично плоский рельєф із невеликою кількістю виступів та впадин (рисунок 55 а,б). Композит на основі ПТФЕ та силікагелю, отриманого механічним способом має ярко виражені включення наповнювача (рисунок 55 в,г), який у вихідному вигляді має основний розмір 5-10 мкм. Однак на отриманих мікрофотографіях можна чітко побачити агломерат наповнювача розміром 20-40 мкм, який у структурі полімерного композиту є мікродифектом. І руйнування при механічній дії на полімерний композит проходить по цьому агломерату зважаючи на невисокий рівень взаємодії його частинок одна з одною. Поверхні сколів композитів, отриманих за *in situ* способом суміщення вихідних компонентів (рисунок 55 д,е) не мають яскраво виражених агломератів наповнювача, який уявляє собою розрізнені частинки сферичної форми розмірами 1-2 мкм. Така різниця у структурі розроблених полімерних композитів і є основним чинником, який впливає на різницю фізико-механічних, теплофізичних та трибологічних властивостей розроблених полімерних композитів, отриманих за механічним та *in situ* способом суміщення вихідних компонентів полімерних композицій.

На рисунку 56 представлені трибологічні властивості вихідного КТПЕ та композитів на його основі.

Аналогічну закономірність щодо покращення трибологічних властивостей при введенні у полімерну матрицю силікагелю можна побачити і при використанні у якості полімерної матриці КТПЕ. Однак значення трибологічних властивостей цього полімеру та композитів на його основі дещо гірші ніж аналогічні для ПТФЕ, що свідчить про різницю у структурі полімерної матриці. Так коефіцієнт тертя зменшується до 0,362 та 0,261 для композитів отриманих за різними способами суміщення полімерних композитів у порівнянні із 0,48 для вихідного КТПЕ. Інтенсивність лінійного зношування досліджених композитів має у 3-4 рази менші значення ніж аналогічний параметр для вихідного полімеру.



а

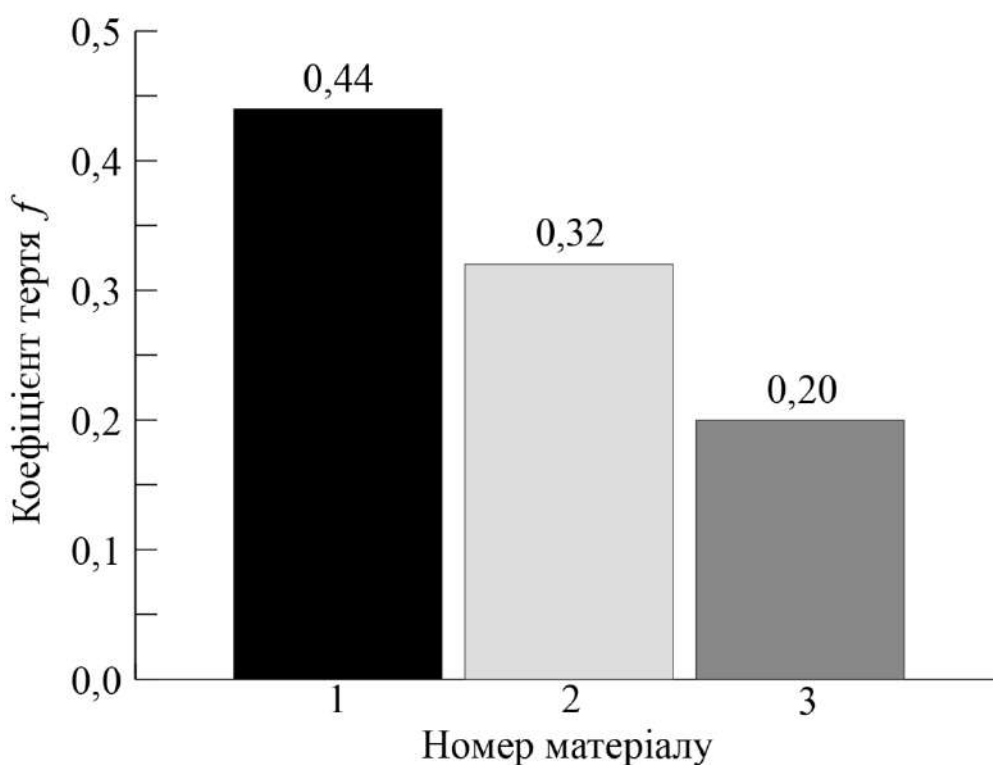


б

Рисунок 56 – Значення (а) коефіцієнта тертя (f) та (б) інтенсивності лінійного зношування (I_h) для вихідного КТПЕ (1) та композитів на його основі, які наповнені 10% силікагелю та отримані за (2) механічним та (3) in situ способами суміщення вихідних компонентів полімерних композицій

На рисунку 57 представлені значення коефіцієнту тертя та інтенсивності лінійного зношування для матеріалів на основі ПВДФ.

Значення досліджених трибологічних параметрів цих матеріалів найбільш близькі до матеріалів на основі КТПЕ, що свідчить про їх споріднені структури та хімічний склад. Так для вихідного полімеру коефіцієнт тертя дорівнює 0,44, а для композитів, які отримані механічним та *in situ* способами суміщення вихідних компонентів він дорівнює відповідно 0,32 та 0,2. Інтенсивність лінійного зношування розроблених матеріалів також має менші значення у порівнянні із вихідним ПВДФ. Так для композиту, отриманого за механічним способом суміщення цей параметр дорівнює 146×10^{-9} м/м, а для аналогічних за складом, але отриманих за способом *in situ* суміщення - 78×10^{-9} м/м. Що у 3 та 6 разів менше ніж інтенсивність лінійного зношування для вихідного ПВДФ.



а

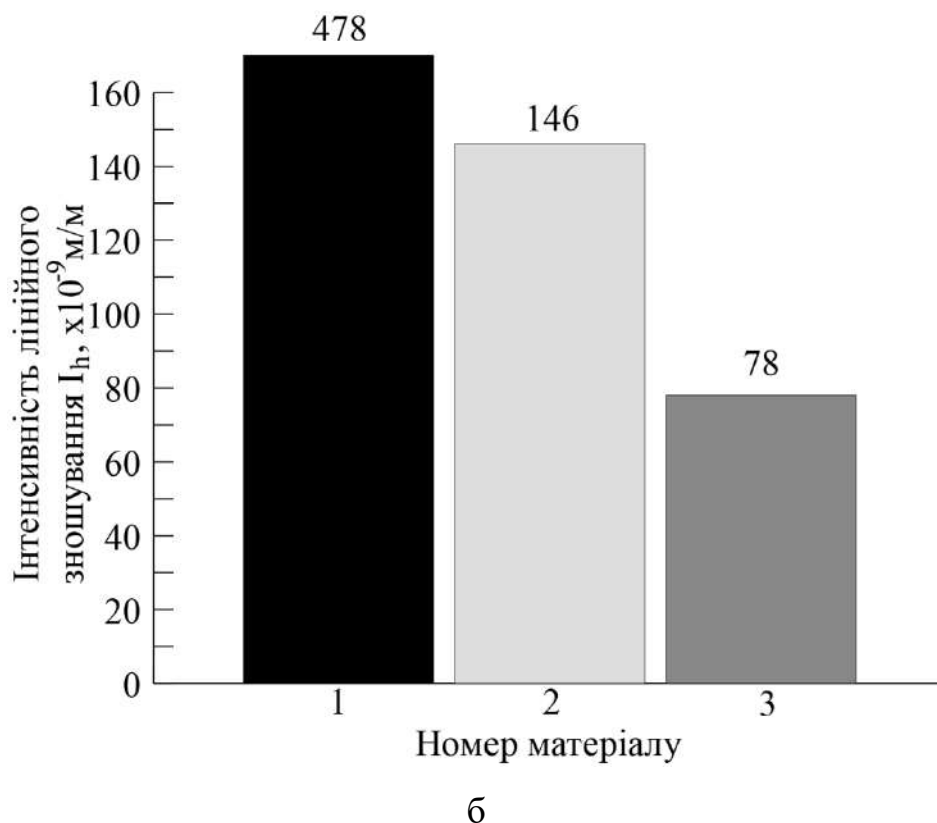
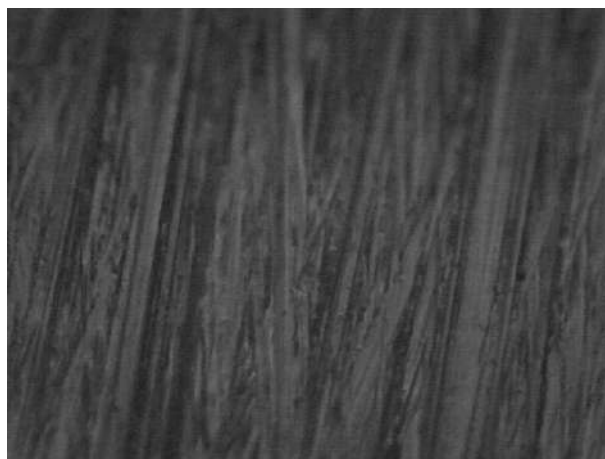


Рисунок 57 – Значення (а) коефіцієнта тертя (f) та (б) інтенсивності лінійного зношування (I_h) для вихідного ПВДФ (1) та композитів на його основі, які наповнені 10% силікагелю та отримані за (2) механічним та (3) *in situ* способами суміщення вихідних компонентів полімерних композицій

Відповідно до проведених досліджень можна зробити висновок, що введення у склад фторполімерів дрібнодисперсного силікагелю покращує рівень їх трибологічних властивостей при фрикційній взаємодії із сталлю. Це пояснюється, як зміною структури полімерного композиту, так і впливом наповнювача на процес тертя при його попаданні у зону тертя. Для доведення цього припущення нами були отримані мікрофотографії металевих поверхонь тертя після їх фрикційної взаємодії із розробленими полімерними композитами. Вони приведені на рисунку 58.



А



Б



В

Рисунок 58 - Мікрофотографії сталеві поверхні тертя (а) до та (б,в) після фрикційної взаємодії із (б) вихідним ПТФЕ та (в) ПТФЕ, наповненим силікагелем

Відповідно до приведених знімків вихідна сталева поверхня до тертя (рисунок 58 а) за морфологією являє собою рельєф, який складається із виступів та впадин шорсткостей, які були отримані при попередньому її притиранні у процесі виготовлення. Після взаємодії із вихідним ПТФЕ її морфологія кардинально не змінилася і уявляє собою виступи і впадини нерівностей профілю, які були сформовані у період попереднього притирання та після взаємодії із вихідним ПТФЕ. Зважаючи на невисокі значення твердості, ПТФЕ не оказує суттєвої руйнуючої дії на виступи нерівностей профілю і шорсткість сталеві поверхні після фрикційної

взаємодії із полімером мають подібні значення (рисунок 58 б) у порівнянні із вихідною поверхнею (рисунок 58 а). Поверхня тертя сталевго зразка після фрикційної взаємодії із полімерним композитом, який наповнений силікагелем (рисунок 58 в) має досить суттєві відмінності у порівнянні із аналогічною після тертя із ненаповненим ПТФЕ. Нерівності профілю на ній не так яскраво виражені, як на попередньо досліджених поверхнях (рисунок 58 б). При цьому впадини шорсткостей заповнені продуктами, які виникають при терті досліджених матеріалів. За рахунок цього створюються, так зване, антифрикційне покриття, яке складається із островків перенесення продуктів тертя, по яких і відбувається фрикційні взаємодія пар тертя. Вони уявляють собою системи, які складаються із об'єктів, створених у результаті зношування, як металевго так і композиційного зразка. Ці системи можуть бути поєднані між собою у результаті трибохімічних реакцій, що відбуваються при фрикційній взаємодії поверхонь і створювати при цьому нові з'єднання, які здатні значно впливати на процес тертя та зношування матеріалів. У нашому випадку створення таких островків позитивно впливає на тертя та зношування досліджуваних матеріалів, покращуючи при цьому їх коефіцієнт тертя та зносостійкість фрикційній взаємодії із сталлю.

Підтвердженням створення нових сполук на сталевій поверхні, яка входить у фрикційну взаємодію із розробленими композитами є зміна її фізичних властивостей. Зважаючи на те, що при терті приймає участь силікагель, то у результаті трибохімічних реакцій можливо створення керамічних сполук на поверхні тертя, які відрізняються високим рівнем твердості і сприяють покращенню тертя та зношування. Тому нами були проведені дослідження мікротвердості поверхонь тертя до та після експериментів. Результати приведені на рисунку 59.

Відповідно до результатів досліджень мікротвердисть сталевго поверхні тертя до та після фрикційної взаємодії із розробленими полімерними композитами мають різні значення. Так вихідна сталева поверхня до тертя має мікротвердість 470 од. тв., а після тертя вона збільшується на 20-25% в залежності від методу отримання полімерного композиту. При цьому твердість сталевго поверхні після тертя із композитом, отриманим за *in situ* способом суміщення вихідних компонентів

полімерних композицій має більші значення ніж аналогічна після фрикційної взаємодії із стандартно отриманим композитом. Що є свідченням створення більш якісного антифрикційного покриття на сталевій поверхні, яке сприяє покращенню тертя та зношування розроблених композитів.

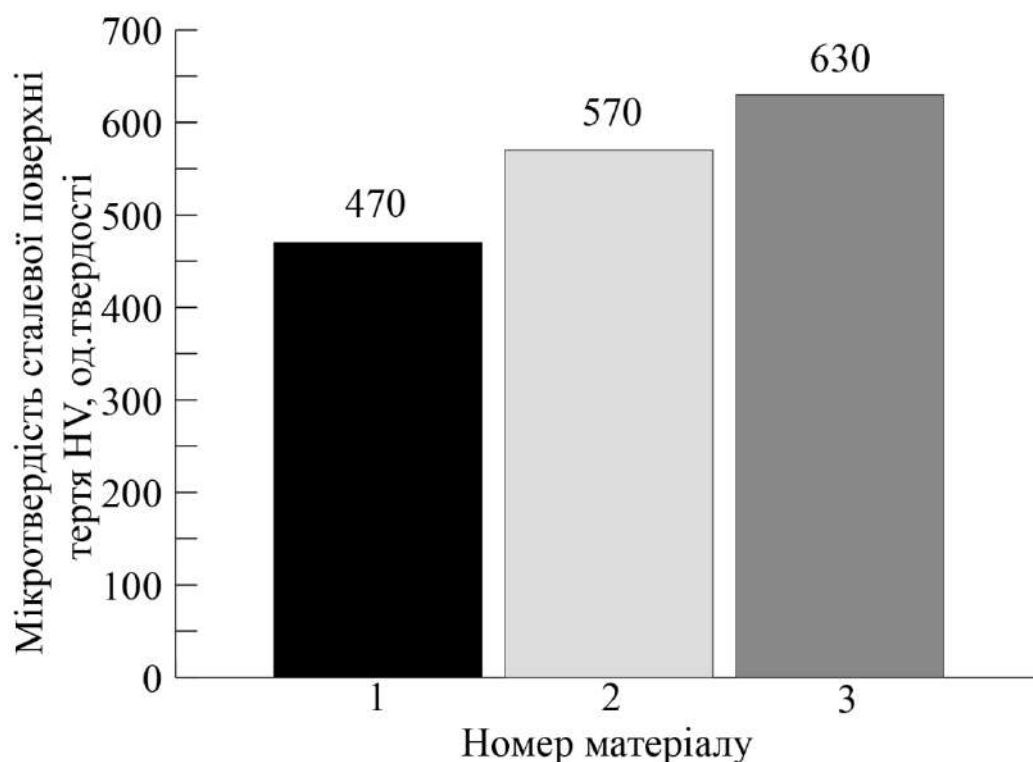


Рисунок 59 – Значення мікротвердості (HV) сталеві поверхні тертя (1) до та (2,3) після фрикційної взаємодії із композитами на основі ПТФЕ, які наповнені 10% силікагелю та отримані за (2) механічним та (3) *in situ* способами суміщення вихідних компонентів полімерних композицій

Це припущення корелює із залежностями значень трибологічних властивостей пар тертя при фрикційній взаємодії матеріалів, отриманих за механічним та *in situ* способами суміщення вихідних компонентів полімерних композицій і підтверджує отримані експериментальні закономірності.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Відповідно до трибологічних властивостей та розповсюдженості обґрунтовано вибір фторполімерів та силікагелю в якості основи і наповнювача для виготовлення композитів для вузлів тертя технологічного обладнання.

2. Розроблена методика отримання композитів на основі фторполімерів та силікагелю із використанням методу *in situ* суміщення вихідних компонентів полімерних композицій у процесі синтезу наповнювача. Встановлено, що якість розподілення силікагелю в об'ємі фторполімерів (ПТФЕ та ПВДФ) для композитів, отриманих за розробленою методикою покращилась у 1,6-1,7 разів у порівнянні із аналогами, отриманими за стандартним механічним методом, про що свідчать значення коефіцієнта неоднорідності та мікрофотографії сколів поверхонь композитів.

3. Визначені оптимальні значення основних параметрів переробки розроблених композитів на основі фторполімерів. Так їх брикетування необхідно проводити при тисках 25-30 МПа із витримкою під тиском 60-90 секунд відповідно в залежності від складу композитів. Визначено, що безпосередню переробку у вироби на основіному етапі переробки композитів на основі фторполімерів необхідно проводити при тиску 40 МПа та температурі 270°C для кополімеру тетрафторетилена з етиленом та 180°C для полівініленденфториду.

4. Досліджено вплив складу та методу переробки композитів на основі фторполімерів на їх теплофізичні властивості. Визначено, то термо- та теплостійкість композитів на основі фторполімерів покращилися на 30-40 та 6-16°C в залежності від складу композитів та методу їх отримання. Що пов'язано із взаємодією полімерних молекул із наповнювачем силікагелем у результаті якого відбувається обмеження їх рухомості при термічній дії на композит. Визначено, що полімерні композити, отримані за допомогою *in situ* суміщення вихідних компонентів полімерних композицій мають на 10-15 та 1-6°C кращі показники значень температур початку активної деструкції та розм'якшення за Віка. Що

пов'язано із кращим розподіленням силікагелю в об'ємі полімерної матриці у композитів отриманих за *in situ* суміщенням їх вихідних компонентів.

5. Досліджено вплив складу та методу переробки композитів на основі фторполімерів на їх фізико-механічні властивості. Визначено, що введення силікагелю до фтопролімерів дозволяє покращити їх напруження при межі текучості та модуль пружності при стисканні та твердість на 25-55% для композиту на основі політетрафторетилену, 25-30% - кополімеру поліетилену із тетрафторетилену та на 30-35% полівініліденфториду. Що є свідченням фізико-хімічної дії наповнювача на полімерну матрицю за рахунок адгезійної взаємодії та виникнення водневих зв'язків. Визначено, що композити на основі політетрафторетилену та полівініліденфториду, отримані за *in situ* методом суміщення їх вихідних компонентів мають на 10-20% кращий рівень фізико-механічних властивостей ніж аналоги, отримані за стандартним (механічним) методом. Що пояснюється кращою якістю розподілення силікагелю в об'ємі фторполімерів для композитів, отриманих за *in situ* методом.

6. Визначено оптимальний час притирання, який дорівнює 10 хвилин (при навантаженні 0,75 МПа та швидкості ковзання 0,75 м/с) для розроблених композитів на основі фторполімерів та силікагелю. Встановлено, що температура на поверхні тертя, коефіцієнт тертя та інтенсивність лінійного зношування для розроблених композитів зменшується на 25-35%, 45-50% та у 4-10 разів в залежності від використаної полімерної матриці у порівнянні із вихідними фторполімерами. Що є наслідком створення на сталевій поверхні антифрикційного покриття, яке складається із островків перенесення продуктів тертя по яких і здійснюється фрикційні взаємодія досліджених пар. Які є результатом трибохімічних реакцій у зоні тертя і мають більшу твердість ніж вихідна сталева поверхня, що дозволяє стверджувати про їх безпосередній вплив на тертя розроблених полімерних композитів.

7. Визначено, що твердість сталевих поверхонь тертя при фрикційній взаємодії композитів, отриманих за *in situ* методом переробки має більші значення, ніж аналогічна після фрикційної взаємодії із стандартно отриманим композитом.

Що є свідченням створення більш якісного антифрикційного покриття на сталевій поверхні, яке сприяє покращенню тертя та зношування розроблених композитів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Holmberg K., Erdemir A. Influence of tribology on global energy consumption, cost and emissions // *Friction*. 2017. № 5 (3). P. 263–284. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>.
2. Хітров І. О., Гавриш В. С., Кристопчук М. Є., Корнієнко В. Я. Ресурсо-та енергозбереження: навч. посіб. Рівне: НУВГП, 2014. 103 с.
3. Новицький А. В., Ружило З. В., Банний О. О., Бистрий О. М., Сиволапов В. А. Надійність машин та обладнання. Частина 1. Оцінка та забезпечення надійності машин та обладнання. К.: НУБіПУ, 2023. 209 с.
4. Hutchings I., Shipway P. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. Elsevier, 2017. 412 p.
5. Кривенко П. В., Пушкарьова К. К., Барановський В. Б. та ін. Будівельне матеріалознавство: підручник. 3-є вид., перероб. та доп. Київ: Ліра-К, 2015. 624 с.
6. Kaczmar J. W., Pietrzak K., Wlosinski W. The production and application of metal matrix composite materials // *J. Mater. Proc. Technol.* 2000. Vol. 106, Nos. 1–6. P. 58–67. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00639-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00639-7).
7. Konopka K. A., Roik T. A., Gavrish A. P. et al. Effect of CaF₂ surface layers on the friction behavior of copper-based composite // *Powder Metall. Met. Ceram.* 2012. Vol. 51, Nos. 5–6. P. 363–367. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-012-9441-2>.
8. Vidilli A. L., Machado I. F., Edalati K. et al. Wear-resistant ultrafine severely deformed brass (Cu-30Zn) // *Materials Letters*. 2024. Vol. 377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.137465>.
9. Beswick J. M. *Rolling Bearing Steel: Design, Technology, Testing, and Measurements*. ASTM International, 2022. 432 p. DOI: <https://doi.org/10.1520/MNL83-EB>.
10. Kaiser M. S. Results of Sn/Pb solder affected aluminum under wear study // *Res. Eng. Struct. Mater.* 2024. Vol. 10, No. 3. P. 957–972.
11. Liu Z., Zhang L., Wang X. et al. Wear behavior of Al–Sn alloys with different distribution of Sn dispersoids manipulated by mechanical alloying and sintering

// Wear. 2008. Vol. 265, Nos. 11–12. P. 1857–1863. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.04.050>.

12. Roik T., Gavrysh O., Vitsiuk I., Khmiliarchuk O. New Copper-Based Composites for Heavy-Loaded Friction Units // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2018. Vol. 56, Nos. 9–10. P. 516–522. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-018-9924-x>.

13. Küçükömeroğlu T., Kara L. The friction and wear properties of CuZn39Pb3 alloys under atmospheric and vacuum conditions // Wear. 2014. Vol. 309, Nos. 1–2. P. 21–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.10.003>.

14. Bian Y., Ni J., Wang C. et al. Microstructure and wear characteristics of in-situ micro/nanoscale niobium carbide reinforced copper composites fabricated through powder metallurgy // Materials Characterization. 2021. Vol. 172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110847>.

15. Mishra S., Aggarwal S. A Review of Performance of Textured Journal Bearing // Tribology Online. 2023. Vol. 18, No. 7. P. 494–507. DOI: <https://doi.org/10.2474/trol.18.494>.

16. Yan J., Zhang X., Wang Y. Review of tribological properties of polyimide-based composite materials. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2023. Vol. 75, No. 8, pp. 883–894. DOI: <https://doi.org/10.1108/ILT-05-2023-0138>.

17. Amroziak K., Roik T., Gavrish O. et al. Improved manufacturing performance of a new antifriction composite parts based on copper // Engineering Failure Analysis. 2018. Vol. 91. P. 225–233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.04.034>.

18. Mishra S., Aggarwal S. A Review of Performance of Textured Journal Bearing // Tribology Online. 2023. Vol. 18, No. 7. P. 494–507. DOI: <https://doi.org/10.2474/trol.18.494>.

19. Akbulut F., Kılıç H., Mutlu İ. et al. Investigation of Tribological Properties of Brake Friction Materials Developed from Industrial Waste Products // Int. J. Automat. Sci. Technol. 2023. Vol. 7, No. 4. P. 309–315. DOI: <https://doi.org/10.30939/ijastech..1373026>.

20. Bsrnhurst R. Designing zinc alloy bearings // Journal of Materials Engineering 1990. Vol. 12. P. 279–285. DOI: 10.1007/BF02834540.

21. Akbari F., Taghiabadi R., Saghafi Yazdi M. et al. Tribology characteristics of novel Zn–Si alloys severely deformed by multi-directional forging // Arch. Civ. Mech. Eng. 2024. Vol. 24. Article 225. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43452-024-01033-1>.
22. Soni P. K., Prasad C. D., Manjunath H. R. et al. Comparison of Tribological Behavior of Hard Faced Fe-Based Metallic Composite Coatings Sprayed Using HVOF // J. Bio-Tribo-Corros. 2025. Vol. 11. Article 5. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40735-024-00924-3>.
23. Li Y., Shi Y., Li S. et al. Effect of Fe content on the microstructure and wear resistance of AlCoCrFeNi high-entropy alloy coating prepared by laser cladding // Appl. Surf. Sci. 2025. Vol. 685. Article 162019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.162019>.
24. Saharudin M. F., Zulkifli N. W. M., Goh Y. et al. Investigation of the tribological and mechanical properties of FeCrMoCB coating on AISI 52100 bearing steel // Tribol. Int. 2024. Vol. 203. Article 110401. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110401>.
25. Sun Y., Yuan J., Wang M. et al. Enhanced tribological performance of NiAl-based composite coatings: Design of the composition in coatings by addition of Mo and Nanodiamond // Tribol. Int. 2025. Vol. 203. Article 110405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110405>.
26. Liu S., Fan C., Wang J. et al. Role of Mo on microstructure evolution and dry-sliding wear mechanism of CoCrNi-based laser cladding coatings // Intermetallics. 2025. Vol. 177. Article 108599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2024.108599>.
27. Sinha S. K., Briscoe B. J. Polymer Tribology. Imperial College Press, 2009. 724 p. ISBN: 978-1-84816-202-0.
28. Stachowiak G. W., Batchelor A. W. Engineering Tribology. 4th ed. Butterworth-Heinemann, 2016. 884 p. ISBN: 978-0-12-810031-8.
29. Кабат О. С., Харченко Б. Г., Деркач А. Д. та ін. Полімерні композиційні матеріали на основі фторопласта і метод їх отримання // Питання хімії та хімічної технології. 2019. № 3. С. 116–122. DOI: <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-124-3-116-122>.

30. Drobny J. G. Fluorine-Containing Polymers // In: Brydson's Plastics Materials. Elsevier, 2017. P. 389–425.
31. Smith D., Iacono S., Iyer S. Handbook of Fluoropolymer Science and Technology. Wiley, 2014. P. 1–21.
32. Dudin V., Makarenko D., Derkach O., Muranov Y. Determination of the influence of a filler on the properties of composite materials based on polytetrafluoroethylene for tribosystems of mechanisms and machines // East.-Eur. J. Enterp. Technol. 2021. Vol. 4, No. 12(112). P. 6–15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.238452>.
33. Huang T., Lin C., Liao K. Numerical sealing performance assessments of PTFE rotary lip seals based on the elasto-hydrodynamic analysis with the consideration of asperity interactions and accelerated wear experimental validations. Wear. 2024. Vol. 532. Article 205706. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205706>.
34. Kalácska Á., Coen A., Poletto J.C., De Baets P., Kalácska G. Tribological investigation of polymer composite dynamic shaft seals in extraterrestrial applications. Lubricants. 2024. Vol. 12, No. 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants12120451>
35. Abadie M. High Performance Polymers - Polyimides Based - From Chemistry to Applications. IntechOpen, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5772/2834>
36. Kobets A., Aulin V., Derkach O., Makarenko D., Hrynkiv A., Krutous D., Muranov E. Design of mated parts using polymeric materials with enhanced tribotechnical characteristics. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020. Vol. 5, No. 12, pp. 54–60. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.214547>
37. Karsli N., Aytac A. Tensile and thermomechanical properties of short carbon fiber reinforced polyamide 6 composites. Composites Part B: Engineering. 2013. Vol. 51. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.03.023>.
38. Kabat O., Sytar V., Derkach O., Sukhyy K. Polymeric Composite Materials of Tribotechnical Purpose with a High Level of Physical, Mechanical and Thermal Properties. Chemistry & Chemical Technology. 2021. Vol. 15, No. 4, pp. 543–550. DOI: <https://doi.org/10.23939/chcht15.04.543>

39. Kabat O., Girin O., Heti K. Polymeric composites based on aromatic polyamide and fillers of spherical and layered structure for friction units of high-performance equipment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2023. Vol. 237, No. 11, pp. 185–207. DOI: <https://doi.org/10.1177/14644207231176796>

40. Aulin V., Rogovskii I., Lyashuk O., Tykhyi A., Kuzyk A., Dvornyk A., Derkach O., Lysenko S., Banniy O., Hrynkiv A. Revealing patterns of change in the tribological efficiency of composite materials for machine parts based on phenylone and polyamide reinforced with arimide-T and fullerene. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 3, No. 12, pp. 40-51. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304719>

41. Каргин В. А. (гл. ред.) Энциклопедия полимеров: в 3 т. Т. 2. Л–Полинозные волокна. М.: Советская энциклопедия, 1974. 1032 с. Стр. 838.

42. Hu H., He Y., Wang Q., Tao L. Preparation and characterization of the polyimide-MoS₂/PTFE composite with high strength and self-adaptive lubricating performance in air and vacuum. *ACS Applied Polymer Materials*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsapm.3c01084>.

43. Buslovich D., Panin S., Luo J., Pogosyan K., Alexenko V., Kornienko L. Influence of the Matrix Material and Tribological Contact Type on the Antifriction Properties of Hybrid Reinforced Polyimide-Based Nano- and Microcomposites. *Polymers*. 2023. Vol. 15, No. 15. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15153266>

44. Zou H., Lin B., Zhang X., Wang Z., Yan S. Observation of anomalous low friction and wear behavior of polyimide in alkaline environment under high load. *Wear*. Vols. 546–547. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205352>.

45. Kanei N., Ito H., Nii H., Otsuka T. Friction and Wear of Polyimide and Graphite Filled Polyimide Composites under Hydrogen Environment. *Tribology Online*. Vol. 19, No. 4, pp. 367-374. DOI: <https://doi.org/10.2474/trol.19.367>.

46. Fei X., Liu S., Subedi A., Ding X., Hu E., Hu K. Investigate on preparation and dry tribological behaviors of onion-like carbon/MoS₂ polyimide coatings. *Applied Surface Science*. Vol. 684. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.161846>.

47. Yu Z., Pei X., Pei Q., Zhang Y., Wang Q., Wang T. Tribological properties of polyimide composite coatings synergistically reinforced by metal-organic frameworks modified carbon fibers and graphite. *Tribology International*. Vol. 201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110289>
48. Li T., Wu J., Wang J., Yu Y., Li X., Wei X., Zhang L. Preparation and tribological properties of porous polyimide modified by graphene. *Industrial Lubrication and Tribology*. Vol. 76, No. 4, 2024, pp. 564–574. DOI: <https://doi.org/10.1108/ILT-12-2023-0415>.
49. Victrex PLC. Injection Molding. Processing Guide. Victrex PLC, 2016. 14 p.
50. Михайлин Ю. А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы [Текст] / Ю. А. Михайлин. СПб: Профессия, 2006. 624 с.
51. Liu W., Wei L., Zhang Y., Chen S., Zhao G., Gao G., Wang H. Investigation of tribological behavior and failure mechanisms of PEEK-based composites, Babbitt alloy, and CuSn10Pb10 bimetal for wind turbine main shaft sliding bearings under simulated operational conditions. *Tribology International*. Vol. 204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110522>
52. Feng C., Guo Y., Yu Z., Chen K., Wang D., Li X., Luo Y., Wang Q., Zhang D. Tribological properties of PEEK composites reinforced by MoS₂ modified carbon fiber and nano SiO₂. *Tribology International*. Vol. 181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108315>
53. Han J., Ma C., Yu C., Liu H., Shang Y., Zhang H. Poly(aryl ether ketone) (PAEK) with Both High Gel Content and High Crystallinity for High-Temperature Applications. *ACS Applied Polymer Materials*. Vol. 7. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsapm.3c01084>
54. Zuo Z., Yang Y., Yan P., Song L., Ji X. Organic Montmorillonite/Polyethersulfone/Polytetrafluoroethylene Ternary Nanocomposites: Characterization and Tribological Performance in Dry Sliding Condition. *Fibers and Polymers*. Vol. 23, 2022, pp. 1475–1489. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12221-022-3413-4>

55. Xue Y., Yan S., Chen Y. Thermomechanical and tribological properties of polyimide and polyethersulfone blends reinforced with expanded graphite particles at various elevated temperatures. *Journal of Applied Polymer Science*. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.52512>
56. Tian D., He C., Buslovich D., Kornienko L., Panin S. The Role of Triboloading Conditions in Tribolayer Formation and Wear Resistance of PES-Based Composites Reinforced with Carbon Fibers. *Polymers*. 2024, 16(15). DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16152180>
57. Pilato L. *Phenolic Resins: A Century of Progress* [Text]. Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 545 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-04714-5>
58. Кабат О. С., Черваков О. В., Кобельчук Ю. М., Андриянова М. В., Суворова Ю. А. Конструкционные фенопласты с высоким уровнем термической стабильности. *Технологические системы*, 2017, Т. 2 (79), С. 33–39.
59. Pilato L. (ed.) *Phenolic Resins: A Century of Progress*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. 545 p. ISBN: 978-3-642-04714-5. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-04714-5>
60. Kabat O. S., Kobelchuk Y. M., Chervakov D. O., Chervakov O. V. Polymer composite materials with a high level of thermal stability based on phenolic resins and disperse silica fillers. *Наука, Технології, Інновації*, 2018, № 2 (6), Р. 48–53.
61. Ліпко О. О., Бурмістр М. В., Кобельчук Ю. М. та ін. Новий терморективний водорозчинний зв'язувач для пресматеріалів. *Вопросы химии и химической технологии*, 2015, № 6, С. 66–73.
62. Полоз О., Ебіч Ю. Поведінка зносостійких епоксидних композицій в умовах контактної-динамічного навантаження. *Проблеми тертя та зношування*, 2021, № 2(91), с. 46–53. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(91\).15528](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(91).15528)
63. Полоз А. Ю., Эбич Ю. Р., Долинская Р. М., Прокопчук Н. Р. Влияние эпоксидсодержащих разбавителей-модификаторов на структуру и свойства износостойких эпоксидных композитов. *Полимерные материалы и технологии*, 2021, Т. 7, № 3, С. 65–73. DOI: 10.32864/polymmattech-2021-7-3-65-73

64. Тагер А. А. *Физико-химия полимеров*. 4-е изд. М.: Научный мир, 2007. 575 с. ISBN: 978-5-89176-437-8
65. Гаркунов Д. Н. *Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин)*. М.: Изд-во МСХА, 2002. 632 с.
66. Shevchenko O. B., Zybailo S. I., Sukhyi K. M., Holovenko V. O., Popytailenko D. V. Estimation of resistance of engine rubber sealants to influence of mixed diesel fuel. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 2021(5), P. 118–123.
67. Anisimov V., Semenets A., Letunovsky M., Strakhov V. Influence of hard blocks on the mechanical properties and abrasive resistance of polyurethanes. *Materials Science*, 2002, Vol. 38, No. 5, P. 723–728. DOI: 10.1023/A:1020180900590
68. Fitzer E. The Future of Carbon-Carbon Composites. *Carbon*, 1987, Vol. 25, No. 2, pp. 163–190. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(87\)90116-3](https://doi.org/10.1016/0008-6223(87)90116-3)
69. Qin Q., Han Y., Zhao H., Zhang C., Li K., Zhang Y., Zhang G., Xu Y. Microstructure and mechanical properties of 2D laminated C/C-SiC composites prepared by low-temperature reactive melt infiltration with silicon alloy. *Journal of the European Ceramic Society*, 2025, Vol. 45, No. 6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2025.117217>
70. Wójcik A., Kopeć-Jarosz A., Gąska A. The importance of thermal influences in the friction process of lignocellulosic granular materials. *Powder Technology*, 2024, Vol. 452, 120534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.120534>
71. Wu J., He J., Yang Y., Zhang L., Zhang J., Zhang Z. A method of using a combination of multiple chemical additives to improve the performance of wood (round tenon) rotary friction welding. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2025, Vol. 83. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-024-01710-7>
72. Saravanan R., Anand R., Boopathi C., Ganesh Babu L., Yasminebegum A., Ravivarman G., Girimurugan R. Mechanical Properties of Polyethylene/Hemp/Lignin Hybridized Composites. *International Journal of Vehicle Structures and Systems*, 2024, Vol. 16, No. 5, P. 17–22. DOI: <https://doi.org/10.4273/ijvss.16.5.1773>
73. Surendranathan A. O. Properties of nanocomposites // *Polymer Nanocomposites*. – 2025. – May. – P. 61–74. – DOI: 10.1201/9781003646235-7.

74. Kabat O. S., Kobelchuk Yu. M., Chervakov D. O., Chervakov O. V. Polymer composite materials with a high level of thermal stability based on phenolic resins and disperse silica fillers // *Naukovi tekhnologii*. – 2018. – No. 2 (6). – P. 48–53.

75. Кабат О. С., Ситар В. І., Сухий К. М. Визначення оптимальних технологічних параметрів при переробці прес-порошків ароматичних поліамідів у виробі // *Полимерный журнал*. – 2017. – № 4. – С. 248–252.

76. Seshadri D. R., Radwan A. N., Bianco N. D., Zorman C. A., Bogie K. M. Flexible and scalable dry conductive elastomeric nanocomposites for surface stimulation applications // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* – 2023. – Vol. 70, No. 1. – P. 1–9. – DOI: [10.1109/tbme.2023.3289059](https://doi.org/10.1109/tbme.2023.3289059).

77. Rothon R. *Fillers for Polymer Applications*. – Springer International Publishing, 2017. – 489 p. – DOI: [10.1007/978-3-319-28117-9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-28117-9).

78. Kabat O., Girin O., Heti K. Polymer composites based on aromatic polyamide and fillers of spherical and layered structure for friction units of high-performance equipment // *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L: J. Mater. Des. Appl.* – 2023. – Vol. 237, Iss. 11. – P. 2669–2676. – DOI: [10.1177/14644207231176796](https://doi.org/10.1177/14644207231176796).

79. Katz H. S., Mileski J. V. *Handbook of Fillers for Plastics*. – Springer Science & Business Media, 1987. – 467 p.

80. Katz H. S., Mileski J. V. *Handbook of Fillers for Plastics*. – Springer Science & Business Media, 1987. – 467 p.

81. Sözen A., Neşer G. On the printability of high-density polyethylene (HDPE) reinforced with long glass and short carbon fibres // *Rapid Prototyping J.* – 2024. – Vol. 31, No. 6. – P. 1–15. – DOI: [10.1108/RPJ-01-2024-0032](https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2024-0032).

82. Karki B., El-Kelesh P. K. Modification of bentonite clay using recycled glass powder and polypropylene fiber // *Geotech. Geol. Eng.* – 2024. – Vol. 42, No. 6. – P. 5051–5064. – DOI: [10.1007/s10706-024-02829-x](https://doi.org/10.1007/s10706-024-02829-x).

83. Курта С. А. *Наповнювачі — синтез, властивості та використання: навч. посіб.* – Івано-Франківськ: Прикарпат. нац. ун-т ім. В. Стефаника, 2012. – 296 с. – ISBN 978-966-640-337-0.

84. Кербер М. Л., Виноградов В. М., Головкин Г. С., Горбаткина Ю. А., Крыжановский В. К. *Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие.* – Санкт-Петербург: Профессия, 2008. – 557 с. – ISBN 978-5-93913-130-8.
85. Гуль В. Е., Кулезнев В. Н. *Структура и механические свойства полимеров: учеб. пособие для вузов.* – Москва: Высшая школа, 1972. – 320 с.
86. Syngellakis S. (ed.) *Natural Filler and Fibre Composites: Development and Characterisation.* – Southampton: WIT Press, 2015. – 236 p. – ISBN 978-1-78466-147-2.
87. Hussain S., Zhao Z., Song Y., Zhang C. Effect of SiO₂ surface modification on the filler-reinforced interfaces in SiO₂-filled functional styrene butadiene rubber composites // *J. Appl. Polym. Sci.* – 2023. – Vol. 140, No. 37. – e54401. – DOI: [10.1002/app.54401](https://doi.org/10.1002/app.54401).
88. Bai X., Yan F., Yuan M., Li H., Zhang Z., Sun J., Dong B., Liu C., Wang Z. Facile fabrication of ultrastrong polyethylene nanocomposite films with low filler content via flow-driven graphene re-dispersion assisted crystallization // *Compos. Part B: Eng.* – 2023. – Vol. 264. – 110904. – DOI: [10.1016/j.compositesb.2023.110904](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110904).
89. Авраменко В. Л., Підгорна Л. П., Черкашина Г. М., Близнюк О. В. *Технологія виробництва та переробки полімерів медико-біологічного призначення.* – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – 240 с.
90. Коршак В. В. *Термостойкие полимеры.* – Москва: Наука, 1969. – С. 12–14.
91. Сиренко Г. А., Свидерский В. П., Герасимов В. Д. *Антифрикционные термостойкие полимеры* – Киев: Техника, 1978 – 246 с.
92. Yang K., Xiao N. Micro/Nanosilver Contribution in Modifying the Lubrication Film to Improve Friction and Wear Behaviors of TiAl-10 wt.%Ag Composite // *Advances in Materials Science and Engineering: Eng.* – 2022. – Vol. 2022. – Article 169938. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/3169938>.

93. Сіренко Г. О., Солтис Л. М. Фізико-хімія явища вибіркового перенесення міді в динамічному контакті твердих тіл (огляд) // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2013. – Т. 14, № 4. – С. 805–809.
94. Yang T., Liu H., Liu L., Yan Y., Li J., Wang J. Synergistic effects of polytetrafluoroethylene fibers and graphite microplates on the tribological performance of polyetherketone composites for seawater lubrication // *Tribol. Int.* – 2024. – Vol. 204. – Article 110492. – DOI: [10.1016/j.triboint.2024.110492](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110492).
95. Sytar V. I., Burya A. I., Burmistr M. V., Danilin D. S., Kabat O. S. Effect of graphite content on wear of thermostable graphite-reinforced plastics // *Proc. World Tribol. Congr. III*. – 2005. – P. 55–56.
96. Сытар В. И., Кабат О. С. Теплостойкие материалы триботехнического назначения на основе ароматического полиамида и дисперсных кремнеземов // *Вопросы химии и химической технологии*. – 2007. – № 4. – С. 94–98.
97. Кабат О. С., Сытар В. И., Митрохин А. А. Термостойкие полимерные композиты специального назначения для тяжело нагруженных узлов трения // *Технологические системы*. – 2017. – Т. 2 (79). – С. 25–33.
98. Кобець А. С., Деркач О. Д., Чигвінцева О. П., Кабат О. С., Рула І. В., Дудін В. Ю., Макаренко Д. О., Бойко Ю. В. *Застосування полімерних композитів в АПК: монографія*. – Дніпро: Журфонд, 2022. – 356 с.
99. Айлер Р. *Химия кремнезема*. – М.: Мир, 1982. – 1127 с.
100. Araújo M. H., Ferreira R. O., Agudelo J. I. P., Pintaude G., Azevedo C. R. F. Effect of silica size on the relative wear of microstructures containing solidification carbides and tempered martensite using a dry sand rubber wheel test // *Tribol. Trans.* – 2024. – Vol. 67, No. 1. – P. 70–86. – DOI: [10.1080/10402004.2023.2291109](https://doi.org/10.1080/10402004.2023.2291109).
101. Суберляк О. В., Баштанник П. І. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів [Текст]. – Львів: Растр-7, 2007. – 376 с.
102. Кузязев И. М., Свидерский В. А., Петухов А. Д. Моделирование экструзии и экструдеров при переработке полимеров. – Киев: НТУУ «КПИИ», 2016.
103. Hutchison J. D., White S. A. *Mixing and Granulation of Bulk Solids*. – New York: Wiley-Interscience, 2003.

104. Кабат О. С., Ситар В. І. Визначення тиску при брикетуванні прес-матеріалів на основі ароматичних поліамідів [Текст] // III Всеукраїнська наукова конференція “Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів”: тези доп. – Дніпро, 2020. – С. 27–28.
105. Manas-Zloczower I. *Mixing and Compounding of Polymers: Theory and Practice*. 2nd ed. – Munich: Hanser, 2009.
106. Rosato D. V., Rosato M. G. *Injection Molding Handbook*. 3rd ed. – New York: Springer, 2000.
107. Pye D. *Injection Molds and Molding: A Practical Guide*. 2nd ed. – New York: Hanser Publishers, 2001.
108. Groover M. P. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. 5th ed. – Hoboken: Wiley & Sons, Incorporated, 2020.
109. Shaw M. C. *Metal Cutting Principles*. 2nd ed. – New York: Oxford University Press, 2005.
110. Adamu M., Rezaur R., Rubiyah B., Khusairy M. Applications of sustainable polymer composites in automobile and aerospace industry // *Advances in Sustainable Polymer Composites*. – Woodhead Publishing, 2020. – P. 185–207.
111. Kaufman B., Briant C. L. *Metallurgical Design and Industry. Prehistory to the Space Age* / Editors B. Kaufman, C. L. Briant. – Springer International Publishing, 2018. – P. 271–346.
112. Kabat O., Makarenko D., Derkach O., Muranov Y. Determining the influence of the filler on the properties of structural thermal-resistant polymeric materials based on Phenylone C1 // *East.-Eur. J. Enterp. Technol.* – 2021. – V. 113. – P. 24–29.
113. Кабат О., Хеті К., Коваленко І., Дудка А. Наповнювачі на основі діоксиду кремнію для полімерних композиційних матеріалів конструкційного призначення // *J. Chem. Technol.* – 2020. – № 2. – С. 247–254.
114. Kumar A., Latthe S., Sudhagar P., Obot I., Gasem Z. In-situ synthesis of hydrophobic SiO₂-PMMA composite for surface protective coatings: Experimental and quantum chemical analysis // *Polymer*. – 2015. – V. 77. – P. 79–86.

115. Drobny J., Ebnesajjad S. *Technology of Fluoropolymers: A Concise Handbook*. – Boca Raton, Florida: CRC Press, 2023.
116. Suberljak O. V., Baštannyk P. I. *Technolohija pererobky polimeriv ta kompozycyjnych materialiv (in Ukrainian)*. – Lviv–Dnipropetrovsk, 2006. – P. 11–23.
117. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками [Текст]. – Л.: Химия, 1975. – 384 с.
118. Кабат О. С., Карпенко В. А., Бабенко В. Г. Вплив методів отримання полімерних композицій на основі термостійких полімерів на якість суміщення їх вихідних компонентів [Текст] // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2020. – № 1 (142). – P. 94–102. <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2020.1.9>
119. Yeromina Y., Burya A. Investigating the influence of overmolecular structure on the properties of metal-containing polymers // *Func. Mater.* – 2021. – V. 27, № 4. – P. 781–785.
120. Kabat O., Sytar V., Heti K., Artemchuk V. A method for obtaining a polymer composite based on aromatic polyamide and silicon dioxide // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. – 2021. – Vol. 56, No. 2. – P. 283–288.
121. Deviz V. A new binder in production of water-resistant briquettes from bituminous coals: Co-polymer binder // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. – Vol. 38, No. 8. – P. 1068–1074.
122. Ozhogin V. V. *Osnovy teorii i tehnologii briketirovaniya (in Russian)*. – Mariupol, 2010. – P. 71–82.
123. Callister W., Rethwisch D. *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach*. 6th ed. – Wiley, Hoboken, New Jersey, 2021.
124. Паньшин Ю. А., Малкевич С. Г., Дунаевская Ц. С. *Фторопласты*. – Л.: Химия, 1978. – 232 с.
125. Кобаяши А. *Обработка пластмасс резанием*. – М.: Машиностроение, 1974. – 192 с.
126. Корягин С. І., Піменов І. В., Худяков В. К. *Способи обробки матеріалів [Текст]*. – Калінінград: Вид-во КУ, 2000. – 448 с.

127. 50-28-87. Рекомендации: формы заточки режущей части резцов для обработки пластмасс и условия их эксплуатации. – Введ. 01.01.1985. – 14 с.
128. Van Beek A. Advanced engineering design. Design for reliability. – Delft: Delft University of Technology Mechanical Engineering, 2012. – 115 p.
129. Закалов О. В., Закалов І. О. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник. – Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. – 322 с.
130. Kabat O. S., Kobets A. S., Derkach O. D., Makarenko D. O., Hnatko O. M. Practice of using parts made of the heat-resistant polymer composites in the chemical industry and agricultural engineering [Text] // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2024. – Vol. 19 (1). – P. 40–47. <https://doi.org/10.59018/012415>
131. Lin L., Zhao Y., Hua C., et al. Effects of the velocity sequences on the friction and wear performance of PEEK-based materials // Tribol Lett. – 2021. – Vol. 69. – P. 1–11.
132. Zhao K., Cai R., Guo S., Yuan H., Fu Y., Araby S., Meng Q. Mechanically robust, corrosion and impact resistance polyimide nanofiber/epoxy composite by mechanochemical fabrication [Text] // Polymer Composites. – 2024. – Vol. 45, No. 13. – P. 12092–12103. <https://doi.org/10.1002/pc.292819>
- Friedrich K. Polymer composites for tribological applications // Adv In Eng P Res. – 2018. – Vol. 1, No. 1. – P. 3–39.
133. Kabat O. S., Bannyk N. G., Voronyi O. M. Polymer composite materials of special purpose for the aerospace and rocket industry [Text] // Science and Innovation. – 2025. – Vol. 21 (1). – P. 95–103.
134. Пікула І. І., Кабат О. С. Визначення оптимальних технологічних параметрів брикетування фторполімерів [Текст] // Вопросы химии и химической технологии. – 2024. – № 2. – С. 70–74. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2024-153-2-70-74>
135. Zewdu Y. T., Kebede H. J., Tadesse A. A., Fekadu A. Y., Abate A. A., Sisay A. K., Gebre F. A., Tadesse T. D., Kassahun W. W., Wondimu T. A., Mengistu M. T., Yeshanew T. A. Application of response surface methodology (RSM) for experimental optimization in biogenic silica extraction from rice husk and straw ash [Text] // Scientific

Reports. – 2024. – Vol. 14, Article No. 12345. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-12345-6>

136. Kabat O., Sytar V., Zicans J., Merijs Meri R. Thermostable polymer composites for tribological purpose [Text] // Advanced Polymer Materials and Technologies: Recent Trends and Current Priorities: Multi-authored monograph. – Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2022. – P. 272–279.

137. Комбалов В. С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. – М.: Наука, 1974. – 112 с.

138. Мур Д. Основы и применение трибоники: Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 488 с.

139. Бартеньев Г. М., Лаврентьев В. В. Трение и износ полимеров. – Л.: Химия, 1972. – 240 с.

140. Белый В. А., Свириденко А. И., Петроковец М. И., Савкин В. Г. Трение и износ материалов на основе полимеров. – Минск: Наука и техника, 1976. – 432 с.

141. Закалов, О.В. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник / О.В. Закалов, І.О. Закалов. – Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. – 322 с.

ДОДАТОК А

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Kabat O. S., Derkach O. D., Pavlushkina N. V., Pikula I. I. Polymeric composites of tribotechnical purpose based on fluoropolymers // Problems of Tribology. – 2019. – Vol. 92, № 2. – P. 75–81. DOI: 10.31891/2079-1372-2019-92-2-75-81 (**фахове видання**);
2. Пікула І. І., Кабат О. С. Визначення оптимальних технологічних параметрів брикетування фторполімерів // Питання хімії та хімічної технології. – 2024. – № 2. – С. 70–74. DOI: 10.32434/0321-4095-2024-153-2-70-74. (**Scopus + фахове видання**);
3. Пікула І. І., Кабат О. С. Визначення оптимальних технологічних параметрів перероблення фторполімерів // Питання хімії та хімічної технології. – 2024. – № 4. – С. 34–40. DOI: 10.32434/0321-4095-2024-155-4-34-40. (**Scopus + фахове видання**);
4. Кабат О. С., Пікула І. І. Композити на основі фторполімерів та метод їх переробки у вироби// Питання хімії та хімічної технології. – 2025. – № 2. – С. 67–74. DOI: 10.32434/0321-4095-2025-159-2-67-74. (**Scopus + фахове видання**);
5. Пікула, І. І. Визначення оптимальних технологічних параметрів при переробці прес порошків на основі фторопласта- // IX Міжнародна науково-технічна конференція «ХІМІЯ ТА СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ» - (м. Дніпро, 24 – 26 квітня 2019 р). - С. 39;
6. Ситар В.І., Кабат О.С., Пікула І.І., Кудрявцев А.В. Композиційні матеріали на основі термостійких полімерів багатофункціонального призначення / X Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Хімія та сучасні технології», Том 2, - (м. Дніпро, 2021). – С. 139-140;
7. Кабат О. С., Пікула І. І., Сула М.П. Фторполімери для вузлів тертя машин і механізмів// Матеріали І Міжнародної наукової конференції «Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів» (м. Дніпро, 20 травня 2022 р.). – С. 65-67;
8. Кабат О. С., Пікула І. І. Технологія переробки фторполімерів у вироби // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Процеси, машини та

обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики» (м. Тернопіль, 29–30 вересня 2022 р.). – С. 139–140. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/39025/2/MNPK_2022_Kabat_O_S-Technology_of_processing_fluoropolymers_139.pdf (дата звернення: 11.06.2025);

9. Ковба А. О., Пікула І. І., Кабат О. С. Фторполімери для вузлів тертя сучасних машин і механізмів // Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів і молодих учених “Наука і сталий розвиток транспорту 2023” (м. Дніпро, 27 жовтня 2023). С. 85–86. URL: https://nmetau.edu.ua/file/2_tom_2.pdf (дата звернення: 11.06.2025);

10. Pikula I.I., Kabat O.S. Nanofilled fluoropolymers for tribological purposes // International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials”(Bukovel, 16-19 of August 2023) – P. 127;

11. Пікула І. І., Кабат О. С. Вплив хімічної структури фторполімерів на температуру розм'якшення по Віка // Тези доповідей XI міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Хімія і сучасні технології» (м. Дніпро, 06 – 07 грудня 2023). Т. 2. – С. 125–126;

12. Пікула І., Кабат О. Визначення температури термічної деструкції композитів на основі фторполімерів // Міжнародна науково-технічна конференція “Перспективні полімерні матеріали та технології” (м. Львів, 2024). – С. 76.

ДОДАТОК Б

Затверджую

Головний інженер

ТОВ «ДНЕПРОПРЕСС СТАЛЬ»

Сухроб'ядоєвич Аміруллоєв

А К Т

промислових випробувань ущільнень з полімерних композиційних матеріалів на основі фторвмісних полімерів, отриманих у роботі “Композити на основі фторполімерів та діоксиду кремнію для вузлів тертя технологічного обладнання” для ущільнення плунжера гідравлічного насоса моделі ДГ3739А3

Завод пресів засновано у січні 1955 року, і більше півстоліття виробництвом пресів для промисловості і іншого обладнання для машинобудування. На підприємстві присутнє технологічне обладнання, необхідне для повного технологічного циклу цього виробництва.

В період з 2024 по 2025 р. аспірантом кафедри інноваційної інженерії Українського державного університету науки і технологій” ННІ “Український державний хіміко-технологічний університет” Пікулою І.І. та його науковим керівником проф. Кабатом О.С. сумісно з представниками підприємства ТОВ «ДНЕПРОПРЕСС СТАЛЬ» були проведені промислові випробування роботи ущільнень з полімерних композиційних матеріалів на основі фторвмісних полімерів, отриманих у результаті виконання наукової роботи “Композити на основі фторполімерів та діоксиду кремнію для вузлів тертя технологічного обладнання” для ущільнення плунжера гідравлічного насоса моделі ДГ3739А3.

У вихідному вигляді ущільнення виготовляються із маслостійкої гуми, яка є ненадійною деталлю, що потребує заміни кожні 2 місяці. Для цього зупиняють насос на 1 день, що призводить до припинення роботи ковальського цеху. Пікулою І.І. та Кабатом О.С. було запропоновано

використання ущільнень плунжерів з полімерних композиційних матеріалів на основі фторвмісних полімерів, які мають більшу зносостійкість ніж аналогічні матеріали і можуть працювати у вузлах тертя без змащування чи у режимах із граничним змащуванням, забезпечуючи при цьому високий рівень його надійності та довговічності. Використання даних ущільнень дало змогу продовжити термін роботи насосу моделі ДГЗ739А3 з 2 до 4 місяців, що у 2 рази зменшило кількість його планових ремонтів та відповідно до цього зменшила час простою обладнання ковальського цеху.

Цей акт не є підставою для пред'явлення фінансових вимог.

Український державний
університет науки і технологій
ННІ "Український державний
хіміко-технологічний
університет"

Розробник, аспірант кафедри
інноваційної інженерії

 І.І. Пікула

Розробник, заведуючий кафедри
інноваційної інженерії

 О.С. Кабат

Представники

ТОВ «ДНЕПРОПРЕСС СТАЛЬ»

Головний механік

 А.О. Аліфіренко