

УДК 620.178.16:678.743.4

*О.С. Кабат, М.П.Сула, М.А. Кулініч***ПОЛІМЕРНІ КОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ ПОЛІТЕТРАФТОРЕТИЛЕНУ ТА СРІБЛА
ДЛЯ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ****ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету
науки і технологій, м. Дніпро, Україна**

У роботі розроблені полімерні композити на основі політертрафторетилену, який наповнений дрібнодисперсним сріблом для використання як конструкційного матеріалу у вузлах тертя та герметизації обладнання харчової промисловості. Досліджено морфологію та гранулометричний склад срібла і політертрафторетиленів і визначено, що полімерна композиція Powder161+срібло при механічному суміщенні за допомогою змішування буде мати кращу якість розподілення вихідних компонентів, ніж при використанні полімеру марки Powder101. Досліджено вплив срібла на властивості одержаних полімерних композитів і встановлено, що його введення у політертрафторетилен дозволяє покращити його твердість за Бринелем з 39,0 по 51,0 МПа, напруження при межі текучості при стисканні з 12,0 по 17,5 МПа та модуль пружності при стисканні до 645 МПа. Окрім того, збільшуються значення температури розм'якшення за Віка та температури початку активної деструкції для розроблених композитів до 168°C та 452°C, відповідно, у порівнянні із вихідним полімером. Також визначено, що коефіцієнт тертя розроблених композитів по сталі має на 10–15% кращі значення, а зносостійкість у 1,6–1,7 разів вища, ніж у вихідного політертрафторетилену.

Ключові слова: політертрафторетилен, срібло, тертя, зношування, мідь, твердість за Бринелем, дрібнодисперсний.

DOI: 10.32434/0321-4095-2025-162-5-146-153

Вступ

При розробці обладнання для харчової промисловості слід приділити значну увагу не тільки конструктивним, технологічним, економічним аспектам, але і запобіганню утворення бактеріального зараження його основних вузлів, особливо тих, які контактують із харчовою продукцією. Одними із таких вузлів є вузли тертя. У харчовому обладнанні їх виготовляють із інертних матеріалів до яких відносяться: деякі нержавіючі сталі, кераміка, полімери тощо [1].

Найбільш перспективними матеріалами для

таких вузлів є полімери. Вони мають низку суттєвих переваг над іншими матеріалами: високий рівень стійкості до дії різних середовищ, достатньо високий рівень фізико-механічних і теплофізичних властивостей, можливість роботи у вузлах тертя без чи при граничному змащуванні [2,3].

Слід зазначити, що не всі полімери та полімерні композиційні матеріали можливо використовувати на виробництвах харчової продукції, навіть якщо вони мають досить високий рівень фізико-механічних, теплофізичних та трибологічних властивостей. Так відомі матеріали трибо-

© О.С. Кабат, М.П.Сула, М.А. Кулініч, 2025



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

O.S. Kabat, M.P. Sula, M.A. Kulinich

логічного призначення на основі фенольних та епоксидних смол, які мають високий рівень термостійкості, міцності та можуть працювати у вузлах тертя без змашування [4,5]. Однак деталі з них не використовуються у обладнанні харчових виробництв внаслідок виділення вільного фенолу і формальдегіду, які є небезпечними для довкілля і здоров'я людини. Відомі полімерні композити на основі полілактиду [6,7], які є відносно небезпечним для людини і мають досить високий рівень фізико-механічних властивостей. Однак такі матеріали не є стійким при дії температури і починає розкладатися вже при температурі 80°C. Відомі термостійкі полімерні композити на основі ароматичного поліаміду, які мають високий рівень термічної стійкості, міцності та трибологічних властивостей [8,9]. Однак наповнювачі, які входять у їх склад мають інтенсивне забарвлення переважно темного кольору і при контакті із харчовим середовищем можуть змінювати його колір. Також вони є відносно небезпечними для використання у харчових виробництвах.

Відповідно до вищезазначеного можна зробити висновок, що полімерні композити для використання на харчових виробництвах повинні бути інертними до дії активних середовищ, мати досить високий рівень термічної стійкості та не забруднювати їжу продуктами зношування при їх контактуванні.

До таких вимог більше всього підходять матеріали на основі фторполімерів. Вони відрізняються високою стійкістю до дії активних середовищ, мають високу термічну стійкість та можуть працювати у вузлах тертя без чи при граничному змашуванні [10]. Також слід відмітити, що ці полімери мають білі чи близькі до білого кольори. Найбільш розповсюдженим фторполімером є політетрафторетилен. Цей матеріал має найвищий рівень хімічної стійкості до агресивних середовищ із усіх відомих полімерів, що випускаються промисловістю. Це обумовлено високою міцністю зв'язків C—F у політетрафторетилені, які є найбільш міцним із усіх відомих у органічній хімії зв'язків вуглецю із іншими елементами. Він розкладається тільки при дії деяких з'єднань розтопи чи розчини лужних металів, трихлористого хлору, газоподібного фтору), які у більшості випадків не використовуються у харчовій промисловості. Також завдяки своїй інертній поверхні на виробках із політетрафторетилену, у більшості випадків не спостерігається розповсюдження біологічних організмів (бактерії, грибки тощо), які є неприпустимими на харчових виробництвах.

Відомо, що політетрафторетилен має досить високу термічну стійкість [11]. Він розкладається тільки при дії на нього температур більше 450°C. Зазвичай такий високий рівень температур не використовується у обладнанні по виробництву харчової продукції. Також політетрафторетилен, завдяки своїй інертній поверхні, має досить високі показники антифрикційних властивостей при фрикційній взаємодії із сталлю. Деталі із цього полімеру можуть працювати у вузлах тертя та герметизації харчового обладнання, забезпечуючи їх високий рівень надійності та довговічності, при навантаженнях до 2 МПа та швидкостях ковзання до 1,5 м/с [12].

До недоліків політетрафторетилену слід віднести відносно невисокий рівень його фізико-механічних властивостей, який є основним обмежуючим фактором широкого використання деталей із цього полімеру у вузлах машин і механізмів. Для подолання цього недоліку у полімер додають різні за природою, морфологією та структурою наповнювачі, які не тільки позитивно впливають на його міцнісні властивості, а і покращують рівень термостійкості та трибологічні властивості.

Виходячи з цього нами запропоновано використовувати в якості полімерної основи для деталей машин і механізмів харчових виробництв політетрафторетилен.

Зважаючи на те, що матеріали розробляються для використання у харчовій промисловості, то необхідно підібрати такий наповнювач, який має не тільки покращити рівень властивостей політетрафторетилену, а і той, що допускається до взаємодії із харчовою продукцією.

Виходячи із попереднього досвіду та практики [13] одним із найбільш підходящих матеріалів для використання у харчових виробництвах є срібло. Цей матеріал має досить високий рівень хімічної стійкості (не взаємодіє із киснем повітря, розчинами лугів тощо). Також срібло відрізняється унікальними антибактерицидними властивостями (іони срібла швидко знищують або пригнічують більшість відомих бактерій та грибків) [14]. Зважаючи на те, що срібло є м'яким металом, то воно може сприяти ефекту самозмашування при фрикційній взаємодії із сталеву поверхню у вузлах тертя машин і механізмів, що значно подовжує їх рівень надійності та довговічності.

Виходячи із цього у роботі в якості наповнювача політетрафторетилену нами запропоновано використовувати дрібнодисперсне срібло.

Методика експерименту

Об'єкти досліджень

В якості полімерів було обрано політетрафторетилену марок: PTFE Powder101 та PTFE Powder161 виробництва Stargetfluoro (Пекін, КНР).

Одержання дрібнодисперсного срібла відбувалося за допомогою взаємодії нітрату срібла (AgNO_3) із міддю (Cu).

Для даного дослідження використовували нітрат срібла (ч.д.а.) виробництва Metalor Technologies SA (Швейцарія) із вмістом срібла 63,5%.

В якості міді було взято мідний анод фосфористий (Cu-DHP – anode PLATE) із вмістом міді 99,94% виробництва Фінляндії.

Методи досліджень

Для отримання фотографій частинок використовували оптичний мікроскоп CarlZeissJenaErgaval, який обладнано цифровим окуляром SCOPETEK DEM-130 (1.3MP). На основі отриманих фото проводили статистичну оцінку щодо визначення основного розміру частинок досліджених полімерів та срібла.

Брикети із полімерів та композитів на їх основі отримували за допомогою прес-форм із діаметром формуючої порожнини 10, 15 та 24 мм на гідравлічному пресі із зусиллям пресування 5 т.

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

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

Напруження при межі текучості (σ_y) та мо-

дуль пружності (E) при стисканні вихідних полімерів та ПКМ на їх основі визначено за ISO 604 на універсальній розривній машині 2167 P-50 згідно з ISO 604.

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

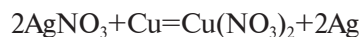
Стійкість об'єктів дослідження до впливу температури вимірювали методом термогравіметричного аналізу згідно з ISO-11358 методами сканування за температурою на дериватографі TGA Q50.

Коефіцієнт тертя, температуру на поверхні тертя та інтенсивність лінійного зношування полімерів та композитів на їх основі визначали за допомогою модернізованої машини тертя СМЦ-2.

Результати та обговорення

Одержання полімерного композиційного матеріалу на основі політетрафторетилену і дисперсних частинок срібла поділяється на кілька етапів, а саме: отримання дисперсних частинок срібла, підготовка полімерної матриці, змішування компонентів полімерної композиції, спікання та надання виробам із розроблених полімерних композитів необхідної чистоти поверхні та форми.

Дисперсні частинки срібла одержують відповідно до реакції:



Після її проведення срібло промивається дистильованою водою від солі та інших побічних продуктів реакції, фільтрується та сушиться при температурі 40°C до повної втрати вологи.

У результаті отримуємо дрібнодисперсне срібло із частинками сфероподібної форми (рис. 1).

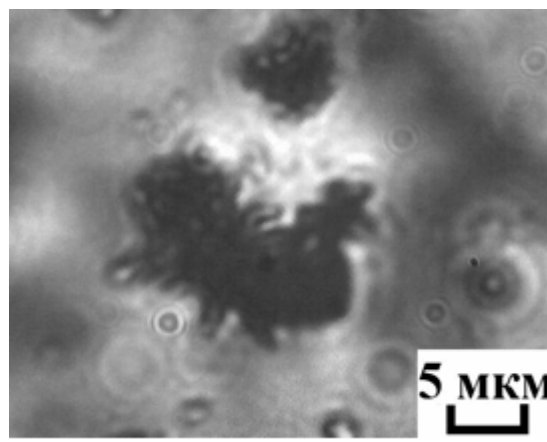
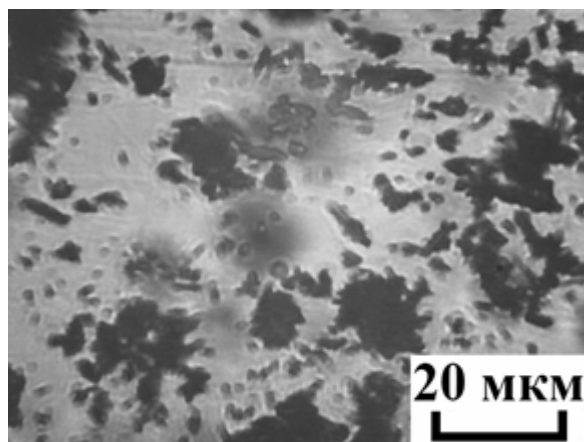


Рис. 1. Фотознімки частинок дрібнодисперсного срібла

Виконавши аналіз дисперсного складу одержаного срібла встановили, що воно має основний розмір частинок в інтервалі 2–10 мкм (рис. 2).

З метою підбору найбільш підходящого з точки зору розміру частинок політетрафторетилену для отриманого нами срібла були досліджені полімери марок Powder161 та Powder101. Фотографії їх частинок наведені на рис. 3.

Відповідно до того, що політетрафторетилен, у вихідному вигляді, являє собою дрібнодисперсні частинки, то для вибору оптимального методу суміщення полімеру із наповнювачем необхідно провести аналіз його дисперсного складу. Результати аналізу наведені на рис. 4.

Відповідно до отриманих результатів можна стверджувати, що основний розмір частинок політетрафторетилену марки Powder161 становить 5–15 мкм, а для полімеру марки Powder101 – 150–200 мкм. Близькість основних розмірів

частинок політетрафторетилену марки Powder161 та отриманого срібла відкриває можливості до їх механічного суміщення за допомогою змішування із отриманням полімерної композиції із високою якістю розподілення вихідних компонентів. Тобто для подальших досліджень в якості полімерної матриці будемо використовувати політетрафторетилен марки Powder161.

Змішування компонентів полімерної композиції, спікання та надання виробам із розроблених полімерних композитів необхідної чистоти поверхні та форми відбувалося відповідно до даних отриманих у попередніх дослідженнях [15].

Цікаво дослідити вплив дрібнодисперсного срібла на рівень фізико-механічних властивостей одержаних полімерних композитів. Відповідно до того, що дані матеріали розроблені для вузлів тертя обладнання харчової промисловості (підшипники кочення, ковзання, напрямні втулки, кільця тощо), до їх основних фізико-механічних характеристик слід віднести густину, твердість, напруження при межі текучості та модуль пружності при стисканні. Вибір інтервалу досліджених концентрацій срібла у фторполімерів був обумовлений результатами попередніх досліджень [15]. На рис. 5 надані результати фізико-механічних досліджень розроблених композитів.

Відповідно до отриманих результатів можна стверджувати, що введення дрібнодисперсного срібла збільшує рівень усіх досліджених властивостей. Так густина досліджених матеріалів збільшується з 2150 кг/м³ (для вихідного полімеру) до 2584 кг/м³ (для композиту із 20% наповнювача). Це пояснюється введенням у склад політетрафторетилену дрібнодисперсного срібла,

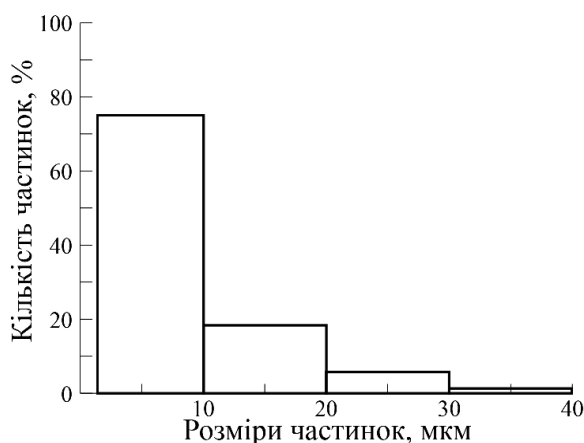
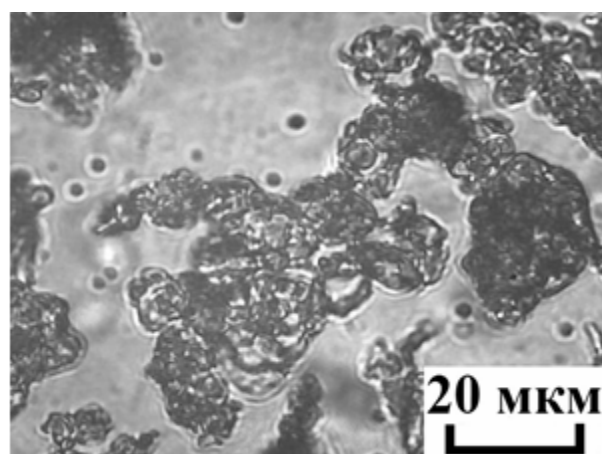
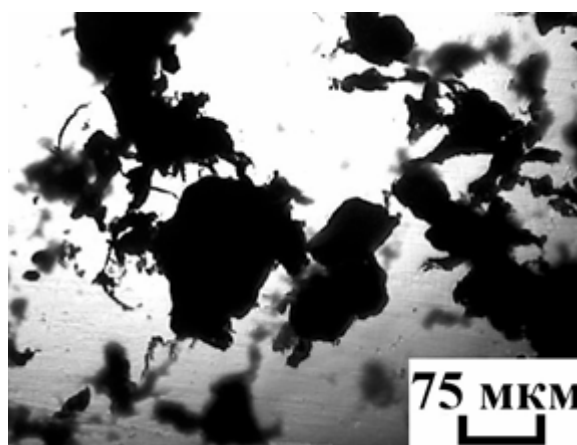


Рис. 2. Гістограма розподілу частинок срібла за розмірами



а



б

Рис. 3. Фотознімки частинок політетрафторетилену марок (а) Powder161 та (б) Powder101

яке має більші значення густини, ніж вихідний полімер. Збільшення значень твердості по Бринелю з 39,0 МПа до 51,0 МПа, напруження при межі текучості при стисканні з 12,0 МПа до 17,5 МПа та модуля пружності при стисканні до 645 МПа пояснюються фізичною взаємодією наповнювача із полімерною матрицею при якій більш міцний та твердий наповнювач позитивно впливає на вихідний полімер. Слід відмітити практично однакову інтенсивність збільшення досліджених характеристик в інтервалі концентрацій наповнювача від 0 до 15% із подальшим її зменшенням в інтервалі від 15 до 20%. Це пов'язано із складністю рівномірно розподілити дрібнодисперсне срібло у об'ємі політетрафторетилену при збільшенні концентрації наповнювача у полімері.

До одних із основних теплофізичних властивостей матеріалів, які використовуються у вузлах тертя відносяться тепло- та термостійкість. Термостійкість визначає межеві температури при яких деталі із досліджених матеріалів будуть зберігати геометричну форму під дією теплового потоку і виходячи з цього забезпечувати високий рівень надійності та довговічності вузла тертя в цілому. Відповідно до того, що політетрафторетилен є термопластичним матеріалом, то дослідження його термостійкості відбувається за допомогою знаходження температури розм'якшення за методом Віка. Термостійкість матеріалів визначає температури при яких термічної деструкції розроблених полімерних композитів не будуть спостерігатися. Для матеріалів вузлів тертя

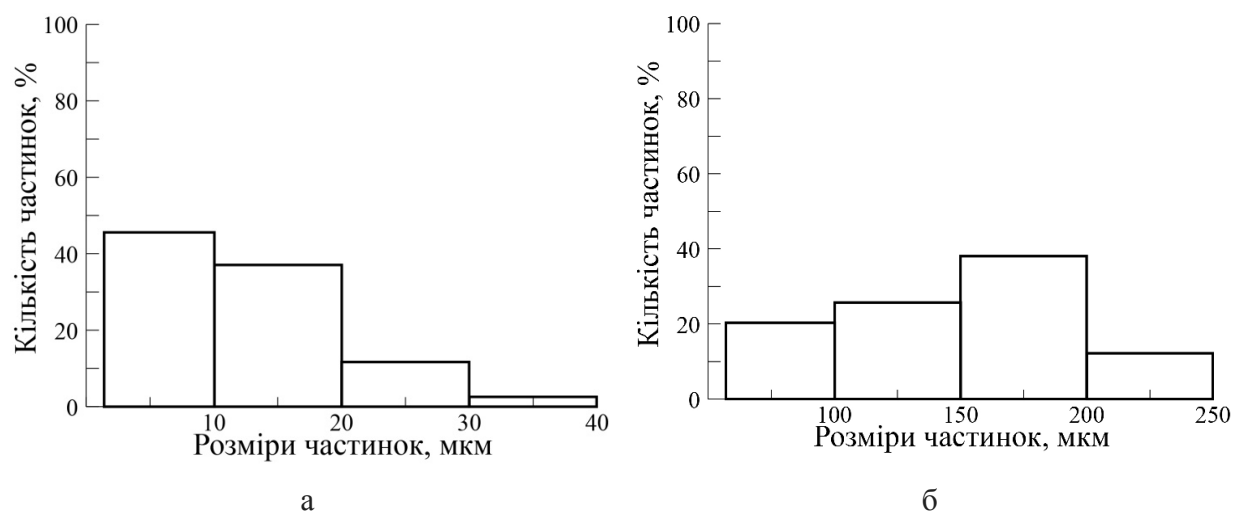


Рис. 4. Гістограми розподілу частинок політетрафторетилену марок (а) Powder161 та (б) Powder101

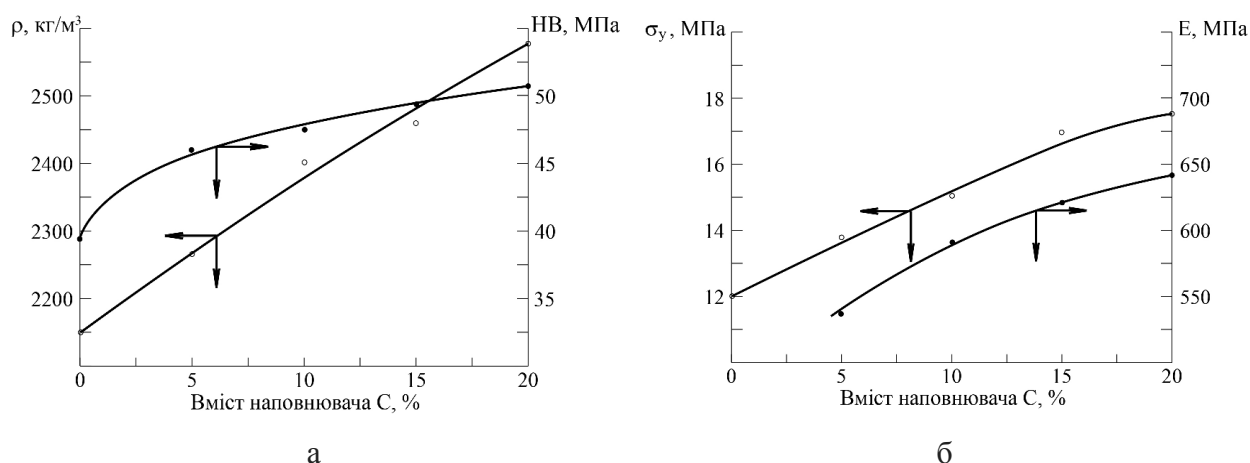


Рис. 5. Залежності (а) густини (ρ), твердості по Бринелю (HB) та (б) напруження при межі текучості (σ_y) та модуля пружності (E) при стисканні від концентрації (C) дрібнодисперсного срібла у політетрафторетилені

харчової промисловості найважливіше значення має температура початку активної деструкція, яка визначається за допомогою термогравіметричного аналізу розроблених полімерних композитів.

Результати досліджених теплофізичних властивостей розроблених полімерних композитів надані на рис. 6. Відповідно до отриманих результатів можна стверджувати, що введення дрібнодисперсного срібла у політетрафторетилен сприяє збільшенню температури розм'якшення за Віка з 152 (для вихідного полімеру) до 168°C (для композиту із 20% наповнювача) та збільшенню температури початку активної деструкції з 438 (для вихідного полімеру) до 452°C (для композиту із 20% наповнювача). Це пояснюється фізичною взаємодією політетрафторетилену із сріблом у результаті якої спостерігається зменшенням рухо-

мості полімерних молекул у композитів у порівнянні із вихідним полімером при дії на них підвищених температур.

Враховуючи те, що розроблені полімерні композити будуть використовуватися у вузлах тертя, то необхідно провести дослідження рівня їх трибологічних властивостей. До основних трибологічних характеристик пар тертя слід віднести коефіцієнт тертя, інтенсивність лінійного зношування та температуру на поверхні тертя. Відповідно до того, що більшість вузлів тертя складаються із полімерних та сталевих деталей, то визначення вищезазначених характеристик буде проводитися на парі тертя полімер-сталь. Результати трибологічних досліджень розроблених композитів надані на рис. 7.

Як видно, спостерігається покращення трибологічних характеристик при введенні дрібнодисперсного срібла у склад політетрафторетилену. Так, коефіцієнт тертя та температура на поверхні тертя зменшуються з 0,21 та (для вихідного полімеру) до 0,18 та 36°C (для композитів, наповнених сріблом). Розроблені композити на основі політетрафторетилену та дрібнодисперсного срібла мають у 1,6–1,7 разів кращі значення інтенсивності лінійного зношування поверхонь, що значно покращить рівень довговічності роботи деталей із цих полімерних матеріалів.

Покращення трибологічних властивостей при фрикційній взаємодії розроблених полімерних композитів із сталлю у порівнянні із вихідним полімером пов'язано із кращими рівнем відведення тепла, яке виникає при терті досліджених композитів у навколишнє середовище, що є наслідком збільшення значень теплопровідності полімерних композитів у порівнянні із вихідним

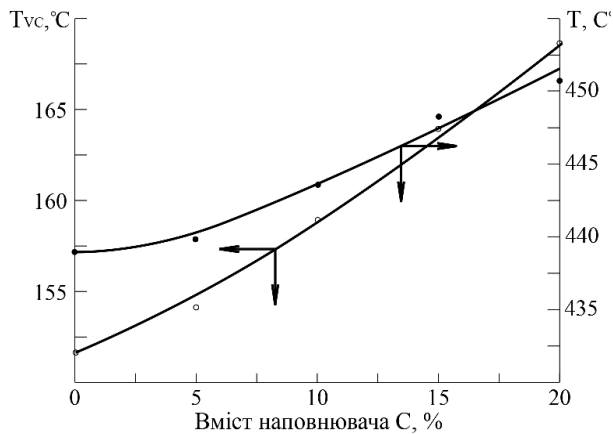


Рис. 6. Залежності (а) температури розм'якшення за Віка (T_{vc}) та (б) температури початку активної деструкції (T) від концентрації (C) дрібнодисперсного срібла у політетрафторетилені

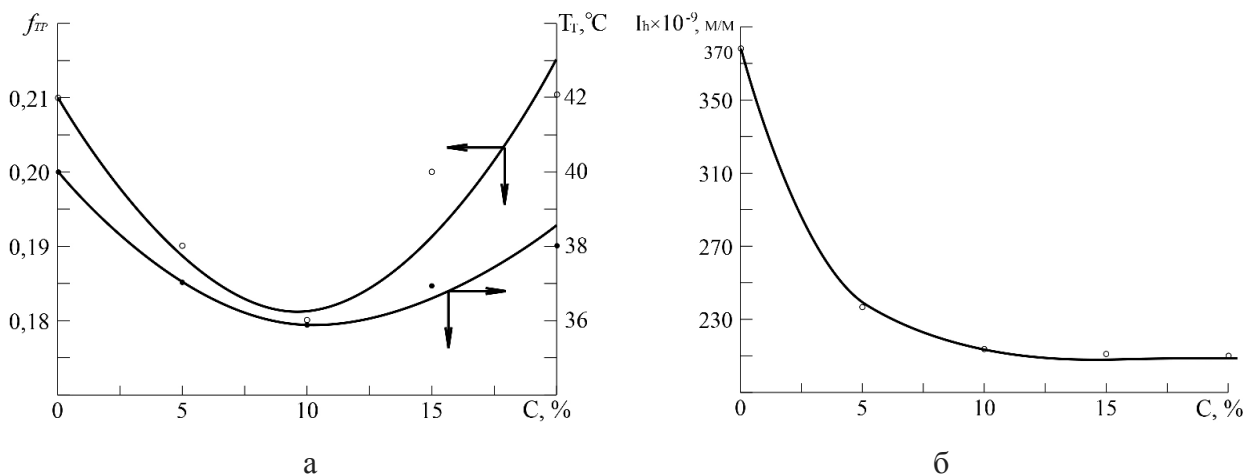


Рис. 7. Залежності (а) коефіцієнта тертя (f) і температури (T_t) на поверхні тертя та (б) інтенсивності лінійного зношування (I_h) від концентрації (C) дрібнодисперсного срібла у політетрафторетилені

полімером. Також введення срібла у політетрафторетилен дозволяє змінити характер тертя дослідженої пари тертя завдяки фізичними та хімічними перетворенням, які відбуваються на поверхнях, що вступають у фрикційну взаємодію.

Висновки

Відповідно до практичних рекомендацій визначено оптимальний склад полімерного композиту (політетрафторетилен+срібло) для використання у вузлах тертя та герметизації обладнання харчової промисловості.

Досліджено морфологію та гранулометричний склад срібла та політетрафторетиленив та визначено, що полімерна композиція Powder161+срібло при механічному суміщенні за допомогою змішування буде мати кращу якість розподілення вихідних компонентів ніж при використанні полімеру марки Powder101.

Встановлено вплив дрібнодисперсного срібла на фізико-механічні, теплофізичні та трибологічні властивості полімерного композиту на основі політетрафторетилену. Визначено, що введення срібла у політетрафторетилен покращує твердість по Бринелю з 39,0 МПа по 51,0 МПа, напруження при межі текучості при стисканні з 12,0 МПа по 17,5 МПа та модуль пружності при стисканні до 645 МПа.

Визначено збільшення температури розм'якшення за Віка та температури початку активної деградації для розроблених композитів до 168°C та 452°C, відповідно, у порівнянні із вихідним полімером.

Встановлено, що розроблені композити мають на 10–15% кращі значення коефіцієнта тертя та у 1,6–1,7 разів вищу зносостійкість, ніж вихідний політетрафторетилен, що разом із результатами досліджень фізико-механічних і теплофізичних властивостей розроблених композитів дозволяє їх рекомендувати до використання у вузлах тертя та герметизації обладнання харчової промисловості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Заплентіков І.М., Мирончук В.Г., Кудрявцев В.М. Експлуатація і обслуговування технологічного обладнання харчових виробництв. – Київ: Центр учб. літ., 2020. – 344 с.
2. Practice of using parts made of the heat-resistant polymer composites in the chemical industry and agricultural engineering / Kabat O.S., Kobets A.S., Derkach O.D., Makarenko D.O., Hnatko O.M. // *ARPN J. Eng. Appl. Sci.* – 2024. – Vol.19. – No. 1. – P.40-47.
3. Kabat O.S., Girin O.B., Heti K.V. Polymer composites based on aromatic polyamide and fillers of spherical and layered structure for friction units of high-performance equipment // *Proc. Inst. Mech. Eng. L J. Mater. Des. Appl.* – 2023. – Vol.237. – No. 11. – P.2669-2676.
4. Pilato L. Phenolic resins: a century of progress. – Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – 545 p.
5. Tribological performances of epoxy resin reinforced by a novel biomass intelligent «pool-channel» oil storage and delivery system / Wang M., Zhou Y., Pan B., Pei L., Zhu L., Feng Y., et al. // *Tribol. Int.* – 2025. – Vol.202. – Art. No. 110355.
6. Kabat O.S., Naumenko O.O., Heti K.V. Optimization of parameters of polylactide processing on a 3D printer // *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. – 2023. – Vol.5. – P.29-35.
7. Comprehensive study of PLA material extrusion 3D printing optimization and its comparison with PLA injection molding through life cycle assessment / Alex Y., Divakaran N.C., Pattanayak I., Lakshyajit B., Ajay P.V., Mohanty S. // *Sustain. Mater. Technol.* – 2025. – Vol.43. – Art. No. e01222.
8. Polymeric composite materials of tribotechnical purpose with a high level of physical, mechanical and thermal properties / Kabat O., Sytar V., Derkach O., Sukhyi K. // *Chem. Chem. Technol.* – 2021. – Vol.15. – No. 4. – P.543-550.
9. Abadie M.J. High performance polymers – polyimidesbased – from chemistry to applications. InTech, 2012. – 254 p.
10. Effect of filling materials on the tribological performance of polytetrafluoroethylene in different wear modes / Fidan S., Korkusuz O., Tokar P., Gulturk E., Ates B., Sennmazcelik T. // *Polym. Compos.* – 2024. – Vol.45. – No. 15. – P.13561-13577.
11. Drobnyy J.G. Fluorine-containing polymers // *Brydson's plastics materials*. – 2017. – P.389-425.
12. Fabrication of polytetrafluoroethylene-reinforced fluorocarbon composite coatings and tribological properties under multi-environment working conditions / Xi C., Zhang B., Ye X., Yan H. // *Polymers*. – 2024. – Vol.16. – No. 24. – Art. No. 3595.
13. Demirbas A., Karsli B. Innovative chitosan-silver nanoparticles: green synthesis, antimicrobial properties, and migration assessment for food packaging // *Food Chem.* – 2025. – Vol.467. – No. 1. – Art. No. 142363.
14. Optimizing encapsulation of garlic and cinnamon essential oils in silver nano-particles for enhanced antifungal activity against Botrytis cinerea pathogenic disease / Bouqellah N.A., Abdulmajeed M.A., Rashed F.K., Mattar E., Al-Sarraj F., Abdulfattah A.M., Mohamed M.H., Baazeem A., Al-Harthi H.F., Musa A., Asseri T.A.Y., Soliman M.H. // *Physiol. Mol. Plant Pathol.* – 2025. – Vol.136. – Art. No. 102522.
15. Полимерные композиционные материалы на основе фторопласта и метод их получения / Кабат О.С., Харченко Б.Г., Деркач А.Д., Артемчук В.В., Бабенко В.Г. // *Питання хімії та хім. технол.* – 2019. – № 3. – С.116-122.

Надійшла до редакції 13.03.2025

**POLYMER COMPOSITES BASED ON
POLYTETRAFLUOROETHYLENE AND SILVER FOR
FRICTION UNITS OF FOOD INDUSTRY EQUIPMENT****O.S. Kabat, M.P. Sula *, M.A. Kulnich****Ukrainian State University of Science and Technologies,
Dnipro, Ukraine***** e-mail: fggtdyfbhfhf@gmail.com**

This work presents polymer composites based on polytetrafluoroethylene filled with finely dispersed silver, intended for use as structural materials in friction units and sealing of food industry equipment. The morphology and particle size distribution of silver and polytetrafluoroethylene were investigated, and it was determined that the polymer composition Powder161+silver, when mechanically combined by mixing, exhibits a more uniform distribution of the initial components than the Powder101 polymer. The effect of silver on the properties of the resulting polymer composites was studied, and it was found that its incorporation into polytetrafluoroethylene increases the Brinell hardness from 39.0 to 51.0 MPa, the compressive yield stress from 12.0 to 17.5 MPa, and the modulus of elasticity in compression to 645 MPa. Additionally, the Vicat softening temperature and the onset temperature of active destruction for the developed composites increased to 168°C and 452°C, respectively, compared to the original polymer. The friction coefficient of the developed composites on steel was 10–15% lower, and the wear resistance was 1.6–1.7 times higher than that of the original polytetrafluoroethylene.

Keywords: polytetrafluoroethylene; silver; friction; wear; copper; Brinell hardness; fine-dispersed.

REFERENCES

1. Zaplentikov IM, Myronchuk VG, Kudryavtsev VM. *Eksploatatsiya i obsluhovuvannya tekhnolohichnoho obladnannya kharchovykh vyrobnytstv* [Operation and maintenance of technological equipment of food production]. Kyiv: Educational Literature Center; 2020. 344. (in Ukrainian).
2. Kabat OS, Kobets AS, Derkach OD, Makarenko DO, Hnatko OM. Practice of using parts made of the heat-resistant polymer composites in the chemical industry and agricultural engineering. *ARPJ Eng Appl Sci*. 2024; 19(1): 40-47. doi: 10.59018/012415.
3. 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 L J Mater Des Appl*. 2023; 237(11): 2669-2676. doi: 10.1177/14644207231176796.
4. Pilato L. *Phenolic resins: a century of progress*. Heidelberg: Springer; 2010. 545 p. doi: 10.1007/978-3-642-04714-5.
5. Wang M, Zhou Y, Pan B, Pei L, Zhu L, Feng Y, et al. Tribological performances of epoxy resin reinforced by a novel biomass intelligent «pool-channel» oil storage and delivery system. *Tribol Int*. 2025; 202: 110355. doi: 10.1016/j.triboint.2024.110355.
6. Kabat OS, Naumenko OO, Heti K.V. Optimization of parameters of polylactide processing on a 3D printer. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2023; (5): 29-35. doi: 10.32434/0321-4095-2023-150-5-29-35.
7. Alex Y, Divakaran NC, Pattanayak I, Lakshyajit B, Ajay PV, Mohanty S. Comprehensive study of PLA material extrusion 3D printing optimization and its comparison with PLA injection molding through life cycle assessment. *Sustain Mater Technol*. 2025; 43: e01222. doi: 10.1016/j.susmat.2024.e01222.
8. Kabat O, Sytar V, Derkach O, Sukhyi K. Polymeric composite materials of tribotechnical purpose with a high level of physical, mechanical and thermal properties. *Chem Chem Technol*. 2021; 15(4): 543-550. doi: 10.23939/chcht15.04.543.
9. Abadie M. *High performance polymers – polyimides based – from chemistry to applications*. InTech; 2012. 254 p. doi: 10.5772/2834.
10. Fidan S, Korkusuz OB, Toker PO, Gulturk E, Ates BH, Sennmazcelik T. Effect of filling materials on the tribological performance of polytetrafluoroethylene in different wear modes. *Polym Compos*. 2024; 45(15): 13561-13577. doi: 10.1002/pc.28718.
11. Drobniy JG. Fluorine-containing polymers. In: *Brydson's plastics materials* (eighth edition). 2017. p. 389-425. doi: 10.1016/B978-0-323-35824-8.00014-1.
12. Xi C, Zhang B, Ye X, Yan H. Fabrication of polytetrafluoroethylene-reinforced fluorocarbon composite coatings and tribological properties under multi-environment working conditions. *Polymers*. 2024; 16: 3595. doi: 10.3390/polym16243595.
13. Demirbas A, Karsli B. Innovative chitosan-silver nanoparticles: green synthesis, antimicrobial properties, and migration assessment for food packaging. *Food Chem*. 2025; 467: 142363. doi: 10.1016/j.foodchem.2024.142363.
14. Bouqellah NA, Abdulmajeed AM, Alharbi FKR, Mattar E, Al-Sarraj F, Abdulfattah AM, et al. Optimizing encapsulation of garlic and cinnamon essential oils in silver nanoparticles for enhanced antifungal activity against *Botrytis cinerea* pathogenic disease. *Physiol Mol Plant Pathol*. 2025; 136: 102522. doi: 10.1016/j.pmpp.2024.102522.
15. Kabat OS, Kharchenko BG, Derkach OD, Artemchuk VV, Babenko VG. Polimernye kompozitsionnye materialy na osnove fluoroplasta i metod ikh polucheniya [Polymer composite based on fluoroplastic and method of the production thereof]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2019; (3): 116-122. (in Russian). doi: 10.32434/0321-4095-2019-124-3-116-122.