УДК 678.033

О.С. Кабат, І.І. Пікула

КОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ ФТОРПОЛІМЕРІВ І МЕТОД ЇХ ПЕРЕРОБЛЕННЯ У ВИРОБИ

ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет», Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна

Розроблені полімерні композиційні матеріали на основі фторполімерів і силікагелю та метод їх переробки у вироби. Визначено доцільність використання як наповнювача політетрафторетилену, кополімер тетрафторетилена з етиленом та полівініліденфторид дрібнодисперсного діоксиду кремнію силікагелю. Відповідно до значень коефіцієнту неоднорідності одержаних полімерних композицій встановлено, що якість розподілення силікагелю у фторполімерах при суміщенні вихідних компонентів полімерних композитів за допомогою стандартного методу змішування у швидкохідній механічній мішалці є середньою. Для її покращення була запропонована методика одержання полімерних композитів на основі фторполімерів та діоксиду кремнію силікагелю, яка полягає в in situ суміщенні вихідних компонентів їх полімерних композицій у процесі синтезу наповнювача. Розроблені полімерні композити, отримані за запропонованою методикою мають на 55–60% кращу якість розподілення ніж ті, що отримані за стандартною. Визначені основі фізико-механічні властивості (густина, напруження при межі текучості та модуль пружності при стисканні, твердість) розроблених полімерних композитів і встановлено, що їх значення мають чітку кореляцію із якістю розподілу силікагелю у фторполімерах. Так, для матеріалів, отриманих за методом in situ суміщення вихідних компонентів полімерних композицій рівень досліджених фізико-механічних властивостей на 5–20% перевищує аналогічний для композитів, отриманих за стандартною методикою перероблення.

Ключові слова: фторполімери, діоксид кремнію, перероблення у вироби, in situ суміщення, фізико-механічні властивості.

DOI: 10.32434/0321-4095-2025-159-2-67-74

Вступ

Сучасне машинобудування не може інтенсивно розвиватися без використання нових матеріалів із кращим рівнем властивостей замість існуючих аналогів [1,2]. 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/м^3), можливістю роботи у вузлах тертя без та із змащуванням тощо [3].

Одними із найбільш розповсюджених груп полімерів є фторполімери. Вони відрізняються найкращою стійкістю до дії агресивних середовищ серед усіх полімерів (набухають і розчиняються тільки при дії деяких органічних розчинників, суміші концентрованих азотної і соляних кислот тощо), високим рівнем термічної стійкості (до 450^{0}С), невеликими значеннями коефіцієнта тертя (до 0,2) при фрикційній взаємодії із сталлю та одною із найкращих зносостійкостей (до 100$\cdot$10^{-9} м/м) із відомих полімерів [4].

Однак фторполімери мають досить невисокий рівень фізико-механічних властивостей (10–60 МПа), що обмежує їх ще більш широке використання у сучасних машинах і механізмах [5,6]. 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 і модифікаторів. Вони вступають у фізичну чи хімічну взаємодію із полімером і мають значення армуючих компонентів отриманої композиції. Найбільше розповсюдження серед наповнювачів та модифікаторів одержали дисперсні тверді матеріали на основі вуглецю та кремнію.

Так відомі полімерні композити, наповнені різними за структурою вуглецевими матеріалами [7,8]. Вони значно покращують рівень трибологічних властивостей полімерних композитів при фрикційній взаємодії із сталлю, але негативно впливають на рівень їх міцності.

Відомі полімерні композити, в яких в якості наповнювачів використовуються кремнієвмісні матеріали [9,10]. Такі наповнювачі дозволяють збільшити як фізико-механічні так і трибологічні властивості полімерів. Тому використання наповнювачів полімерів на основі кремнієвмісних матеріалів більш актуально.

Більшість кремнієвмісних наповнювачів надані у вигляді діоксиду кремнію різних модифікацій, із притаманною їм структурою та морфологією. Вони відрізняються досить розвиненою поверхнею (рис. 1) на якій знаходиться велика кількість активних силанольних груп (SiOH), здатних до фізичної та хімічної взаємодії із полімером (рис. 2).

У роботі [11] 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 (рис. 2).

У роботі [12] доведена взаємодія силанольних груп із метакрилатними у процесі одержання композиту на основі поліметилметакрилату із діоксидом кремнію. Зважаючи на це використання діоксиду кремнію для наповнення фторполімерів є досить актуальним.

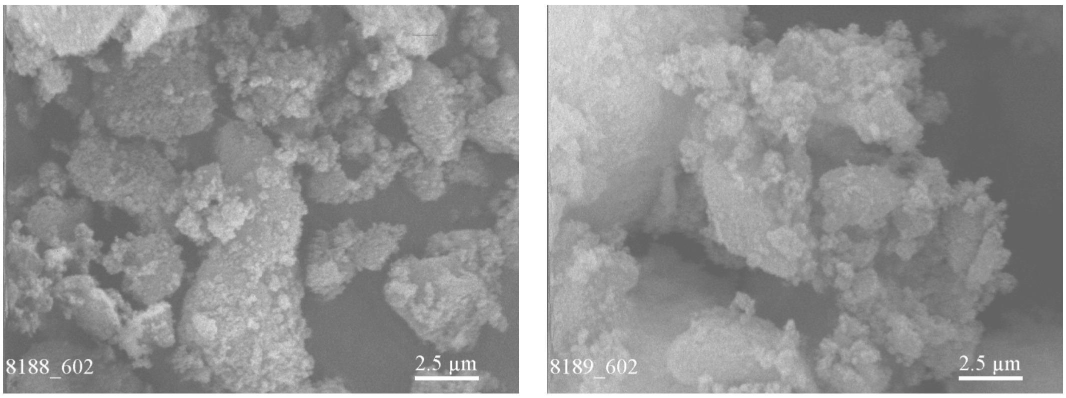
Переваги, які притаманні діоксиду кремнію при використанні його як наповнювача полімерів, є і його частковими недоліками. Так, завдяки досить розвиненій активній поверхні його частинки схильні до агрегації і створюють агломерати розмірами у десятки мікрометрів, які досить складно зруйнувати. Вони виступають як мікро- та макродефектів структури одержаних полімерних композитів, та компоненту, який досить складно рівномірно розподілити у полімерній матриці. Це все негативно впливає на рівень фізико-механічних властивостей одержаних полімерних композитів.

Тому досить актуальним є розробка методики сумісної переробки диоксидів кремнію із полімерами завдяки якій вдасться максимально подрібнити агломерати наповнювача та рівномірно розподілити їх в об'ємі полімерної матриці.

Методика експерименту

Об'єкти досліджень

Як об'єкти досліджень були обрані наступні фторполімери: політетрафторетилен (ПТФЕ), кополімер тетрафторетилена з етиленом (КТФЕ), полівініліденфторид (ПВДФ). У вихідному вигляді досліджені фторполімери являють собою дрібнодисперсні порошки білого кольору із на-



а б

Рис. 1. Мікрометричні знімки частинок діоксиду кремнію сипною щільністю від 0,35–0,50 г/см^3 і переважними розмірами частинок 10–20 мкм

Методи досліджень

Мікрометричні знімки частинок діоксиду кремнію та поверхонь полімерних композитів отримані за допомогою електронного (Superprobe-733 (Jeol)) та оптичного (МБС-9) мікроскопів, оснащених камерами для електронних мікрофотографій.

Рівномірність розподілу наповнювача в полімерній композиції оцінюється за допомогою коефіцієнта неоднорідності (V_C):

$$V_C = \frac{100}{H} \cdot \sqrt{\frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(c_i - H)^2\right]}{n-1}}. \quad (1)$$

де c_i – вміст наповнювача у полімерній композиції, %; H – вміст наповнювача при ідеальному розподілі, %; n – загальна кількість проб полімерної композиції.

При ідеальному розподілі вихідних компонентів полімерної композиції коефіцієнт V_C дорівнює одиниці. Значення коефіцієнта неоднорідності в інтервалі 1–2 вказують на високу, в інтервалі 2–5 – на середню і більше 5 – на низьку якість розподілення наповнювача у полімері.

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

Напруження при межі текучості (σ_y) та модуль пружності (E) при стисканні досліджуваних полімерів визначали за ISO 604 на універсальній розривній машині 2167 P-50.

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

Результати та їх обговорення

Відповідно до здійснених раніше досліджень [13] 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 діоксидом кремнію (основний розмір частинок 10–20 мкм) можливо здійснити за допомогою стандартних процесів змішування дрібнодисперсних матеріалів.

Досить ефективним методом змішування є електромагнітний [14]. Він полягає у активній дії дисперсних молольних тіл, які хаотично переміщуються у магнітному полі змішувача на компоненти полімерної композиції змушуючи їх рівномірно розподілятися в об'ємі та подрібнюючи агломерати наповнювача. Однак використання цього обладнання має досить суттєвий недолік, який полягає у засміченні полімерної композиції продуктами зношування молольних 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 одержаних полімерних композитів.

У даній роботі рівномірність розподілу наповнювача у композитах оцінювали за фото поверхонь сколів досліджених полімерних композитів одержаних на оптичному мікроскопі (рис. 3).

Кількісний розрахунок якості розподілення вихідних компонентів у полімерних композитах здійснювався за допомогою знаходження їх коефіцієнту неоднорідності, який визначається за порівнянням площ, що займає діоксид кремнію

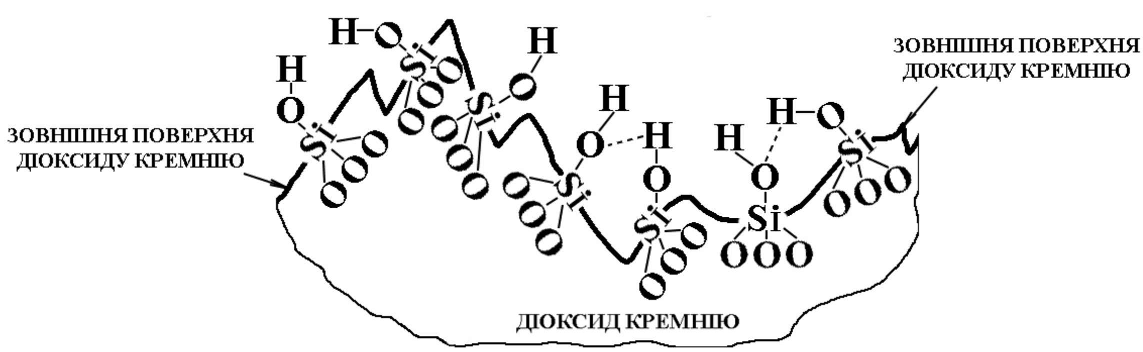
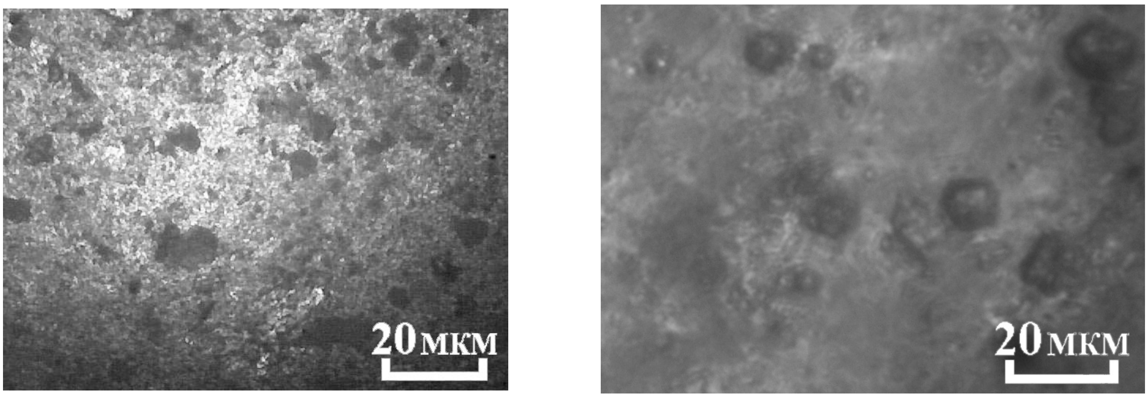


Рис. 2. Схематичне зображення силанольних груп на поверхні діоксиду кремнію



а б

Рис. 3. Мікрофотографії поверхонь полімерних композитів силікагель+фторполімер: а – КТФЕ; б – ПВДФ

та фторполімер на поверхнях сколів розроблених матеріалів.

Отримані результати розрахунків наведені на графіку (рис. 4). 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 роботі [15] 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 і діоксиду 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

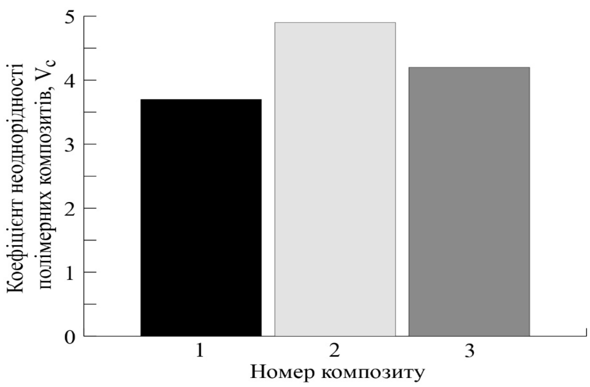


Рис. 4. Значення коефіцієнта неоднорідності V_C полімерних композитів силікагель+фторполімер: 1 – ПТФЕ; 2 – КТФЕ; 3 – ПВДФ

рідинне середовище де відбувається синтез силікагелю із водяного розчину натрій метасилікату, який при постійному перемішуванні підкислюються розбавленою соляною кислотою. Схема in situ суміщення вихідних компонентів полімерних композицій на основі фторполімерів і силікагелю у процесі синтезу наповнювача зображена на рис. 5.

Відповідно до неї у водневий розчин натрій силікату при постійному його перемішуванні додаються тверді частинки фторполімеру (рис. 5,а). Створена при цьому суспензія є системою в якій тверді частинки полімеру знаходяться у хаотичному русі і рівномірно розподілені у рідинному середовищі (рис. 5,б). Одержана суспензія підкислюється 10% водяним розчином HNO_3 до pH 6,5–7,5 (рис. 5,в). При цьому відбувається практично моментальне утворення застиглого аквагелю в якому знаходяться рівномірно розподілені частинки фторполімеру (рис. 5,г). Отриману систему акварель+фторполімер піддають поступовій сушці при температурі 30–40^{0}C (рис. 5,д) при якій відбувається значне зменшення її об'єму за рахунок випаровування вологи із аквагелю, що приводе до його усадження з охопленням при цьому твердих частинок фторполімерів (рис. 5,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 (рис. 5,ж) йде на подальше перероблення у вироби.

Оцінювання якості розподілення силікагелю у полімерних композитах, отриманих за запропонованою схемою, проводили за знаходженням коефіцієнта їх неоднорідності. Результати наведені у таблиці.

Значення коефіцієнтів неоднорідності розподілення силікагелю у полімерних композитах

Метод одержання полімерної композиції	Значення коефіцієнта неоднорідності V_C		
	ПТФЕ+SiO_2	КТФЕ+SiO_2	ПВДФ+SiO_2
стандартний	3,7	4,9	4,2
in situ	2,1	7,8	2,6

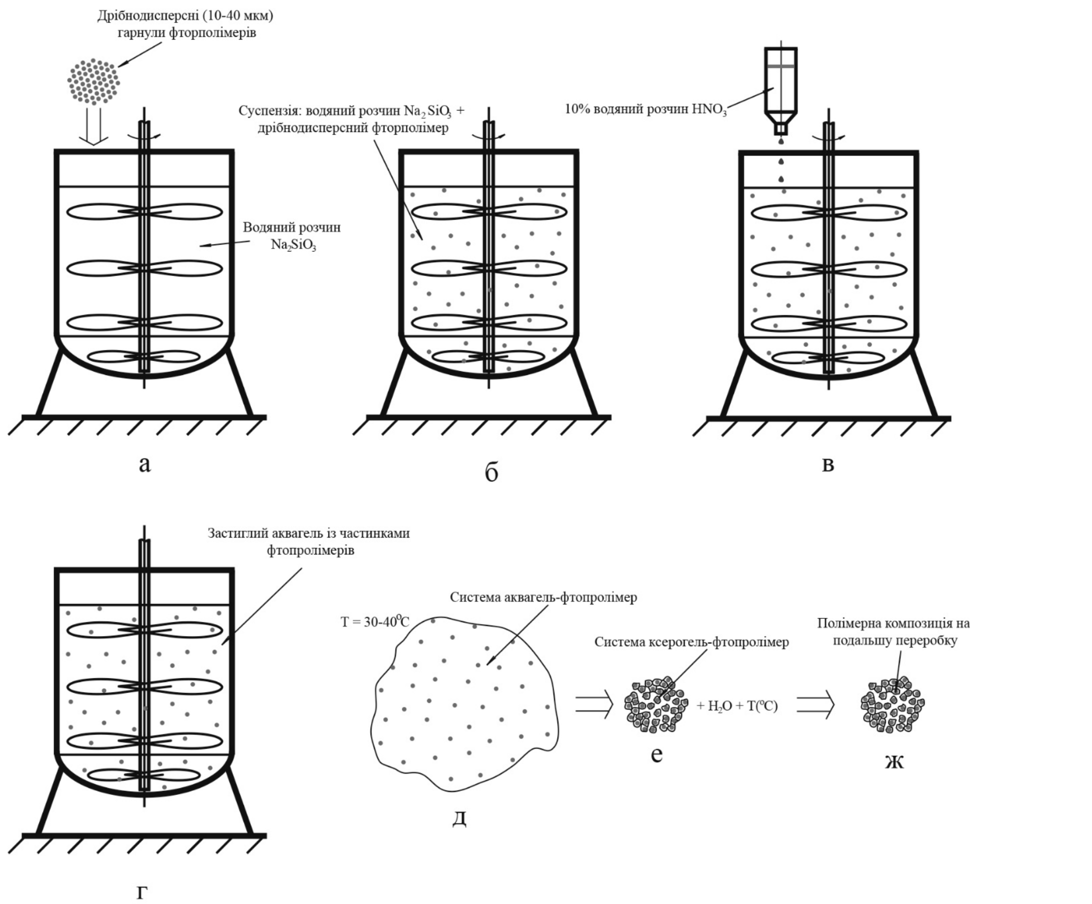


Рис. 5. Схема in situ суміщення вихідних компонентів полімерних композицій на основі фторполімерів і силікагелю у процесі синтезу наповнювача

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. При цьому їх значення відповідають високій якості розподілення наповнювача у полімерній матриці. Для матеріалу на основі КТФЕ спостерігається збільшення коефіцієнта 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 одержати суспензію із рівномірно розподіленими частинками твердої речовини (полімер не тонув і знаходився на поверхні водяного розчину натрій силікату).

Становить інтерес дослідити, як метод перероблення полімерних композитів впливає на їх значення фізико-механічних властивостей. До одних із найбільш важливих фізико-механічних властивостей відносяться густина, твердість, напруження при межі текучості та модуль пружності при стисканні.

Відповідно до здійснених досліджень основні фізико-механічні властивості розроблених полімерних композитів (густина, напруження при межі текучості та модуль пружності при стисканні, твердість), отриманих за in situ методикою переробки мають на 5–20% вищий рівень ніж для композитів, отриманих за стандартною методикою (рис. 6). Причому це характерно для полімерних композитів на основі ПТФЕ та ПВДФ. Для матеріалів на основі КТФЕ спостерігається деяке зменшення досліджених властивостей. Слід відмітити, що рівень фізико-механічних властивостей розроблених композитів чітко корелює із якістю розподілення силікагелю у фторполімерах, що визначено раніше за значеннями коефіцієнтів неоднорідності (таблиця). Так, матеріали із найменшими значеннями коефіцієнта неоднорідності (найвищою якістю розподілення наповнювача у полімерній матриці) мають найкращий рівень фізико-механічних властивостей. Це свідчить про чітку закономірність, яка пов'язує якість розподілення наповнювача у полімерній матриці із його рівнем властивостей.

Відповідно до здійснених досліджень можна стверджувати, що запропонована методика отримання полімерних композицій при in situ суміщенні їх вихідних компонентів у процесі синтезу наповнювача дозволяє одержати полімерні композити із кращою якістю розподілення силікагелю у фторполімерах, що покращує їх фізико-механічні властивості на 5–20%.

Висновки

Розроблені полімерні композити на основі фторполімерів (політетрафторетилену, кополімеру тетрафторетилену з етиленом та поліініліденфториду), які наповнені діоксином кремнію силікагелем.

Розроблена нова методика одержання полімерних композицій для матеріалів на основі фторполімерів та силікагелю, яка полягає у in situ суміщенні їх вихідних компонентів у процесі синтезу наповнювача.

Визначено, що якість розподілення силікагелю у ПТФЕ та ПВДФ для композитів, одержаних за in situ методикою на 55–60% краща, ніж для аналогів, отриманих за стандартною. Для матеріалів на основі КТФЕ якість розподілення виявилась нижчою внаслідок неможливості рівномірно розподілити частинки полімеру у реакційно активному середовищі при синтезі наповнювача.

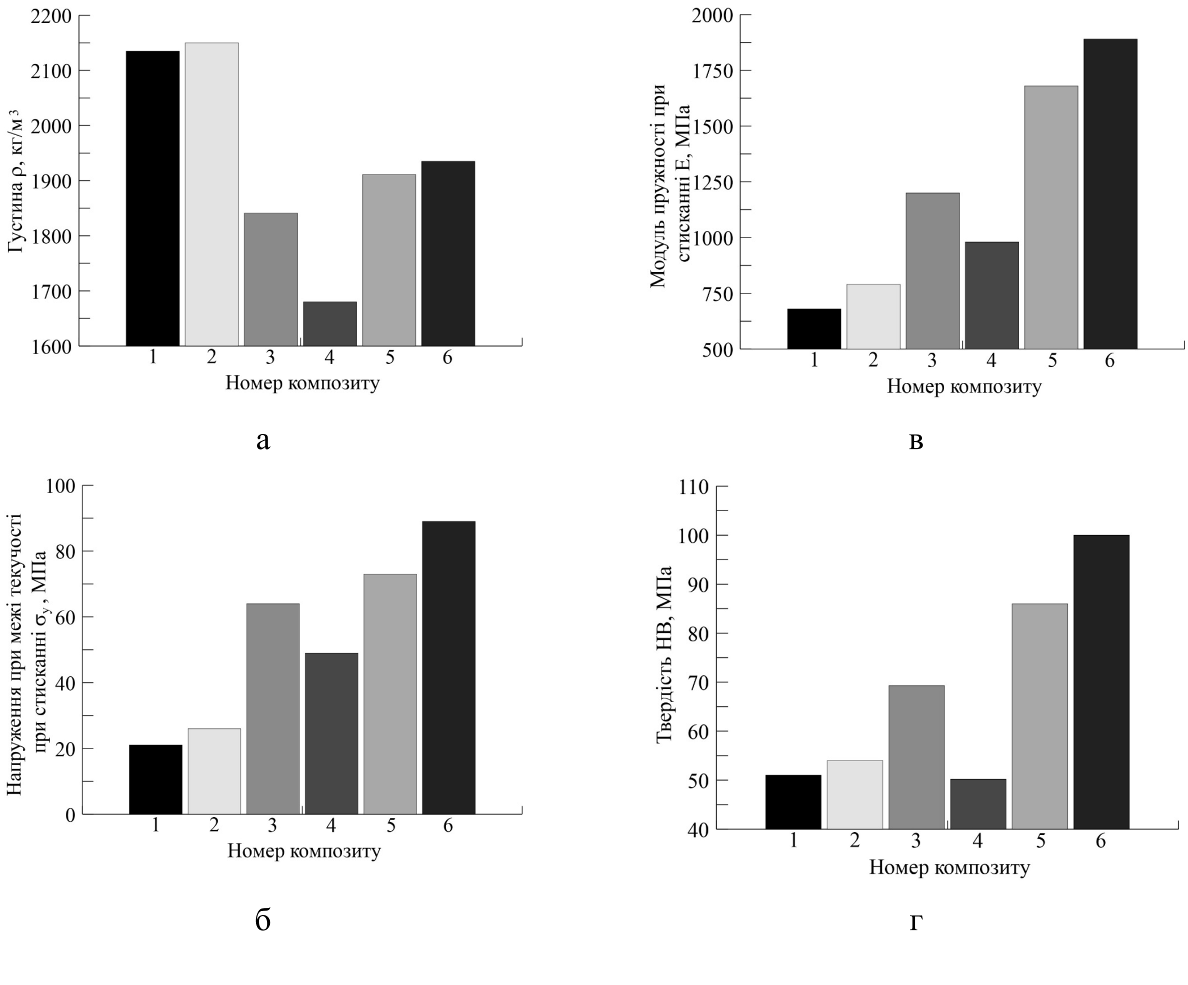


Рис. 6. Значення (а) густини, (б) напруження при межі текучості та (в) модуля пружності при стисканні, (г) твердості полімерних композитів на основі у фторполімерів: 1 – ПТФЕ; 2 – КТФЕ; 3 – ПВДФ

Визначені основі фізико-механічні властивості (густина, напруження при межі текучості та модуль пружності при стисканні, твердість) розроблених полімерних композитів і встановлено, що їх значення мають чітку кореляцію із якістю розподілу силікагелю у фторполімерах. Так для матеріалів, отриманих за методом (in situ) суміщення вихідних компонентів полімерних композицій рівень досліджених фізико-механічних властивостей на 5–20% перевищує аналогічний для композитів отриманих за стандартною методикою переробки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Applications* of sustainable polymer composites in automobile and aerospace industry / Muhammad A., Rahman M.R., Baini R., Bakri M.K.B. // Woodhead publishing series in composites science and engineering, Advances in sustainable polymer composites. – Woodhead Publishing, 2020. – P.185-207.

2. *Kaufman B., Briant C.L.* Metallurgical design and industry. Prehistory to the space age. – Springer International Publishing A&G. – 2018. – P.271-346.

3. *Determining* the influence of the filler on the properties of structural thermal-resistant polymeric materials based on Phenylone C1 / Kabat O., Makarenko D., Derkach O., Muranov Y. // East. Eur. J. Enterpise Technol. – 2021. – Vol.113. – P.24-29.

4. *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 хімічної технології. – 2019. – № 3. – С.116-122.

5. *Drobniy J.G.* Fluorine-containing polymers // Brydson's plastics materials. – Elsevier, 2017. – P.389-425.

6. *Smith D.W., Iacono S.T., Iyer S.S.* Handbook of fluoropolymer science and technology. – Hoboken, New Jersey: Wiley, 2014. – P.1-21.

7. *Dry* sliding wear characteristics of carbon filled polytetrafluoroethylene (PTFE) composite against aluminium 6061 alloy / Sonawane A., Deshpande A., Chinchanikar S., Munde Y. // Mater. Today Proc. – 2021. – Vol.44. – P.3888-3893.

8. *Effect* of filling materials on the tribological performance of polytetrafluoroethylene in different wear modes / Fidan S., Korkusuz O.B., Toker P.O., Gulturk E., Ates B.H., Sənmazcelik T. // Polym. Compos. – 2024. – Vol.45. – No. 15. – P.13561-13577.

9. *Preparation* of hollow silica/PTFE fiber membrane with excellent thermal insulation performance by electrospinning / Wang G., Wang L., You J., Yang Y., Wang Y., Wang W., et al. // Appl. Therm. Eng. – 2024. – Vol.255. – Art. No. 123959.

10. Study on preparation of SiO_2/PTFE aerogel-like materials via atmospheric drying and their thermal insulation performance / Wang S., Su X.L., Zheng W.J., Yang F., Li H., Zou W. // J. Sol-Gel Sci. Technol. – 2023. – Vol.109. – P.201-214.

11. *Fillers* on the silica base for polymer composites of constructional purpose / Kabat O.S., Heti K.V., Kovalenko I.L., Dudka A.M. // J. Chem. Technol. – 2019. – Vol.27. – No. 2. – P.247-254.

12. *In-situ* synthesis of hydrophobic SiO_2-PMMA composite for surface protective coatings: experimental and quantum chemical analysis / Kumar A.M., Latthe S.S., Sudhagar P., Obot I.B., Gasem Z.M. // Polymer. – 2015. – Vol.77. – P.79-86.

13. *Пікула І.І., Кабат О.С.* Визначення оптимальних технологічних параметрів брикетування фторполімерів // Питання хімії та хім. технол. – 2024. – No. 2. – P.70-74.

14. *Yeriomina Ye.A., Burya A.I.* Investigating the influence of overmolecular structure on the properties of metal-containing polymers // Funct. Mater. – 2020. – Vol.27. – № 4. – P.781-785.

15. *A method* for obtaining a polymer composite based on aromatic polyamide and silicon dioxide / Kabat O., Sytar V., Heti K., Artemchuk V. // J. Chem. Technol. Metall. – 2021. – Vol.56. – No. 2. – P.283-288.

Надійшла до редакції 05.11.2024

COMPOSITES BASED ON FLUOROPOLYMERS AND A METHOD FOR THEIR PROCESSING INTO PRODUCTS

O.S. Kabat**, *I.I. Pikula

Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine

*** e-mail: Amber_UDHTU@i.ua**

Polymer composite materials based on fluoropolymers and silica gel, as well as a method for their processing into products, have been developed. The feasibility of using polytetrafluoroethylene, tetrafluoroethylene-ethylene copolymer, and polyvinylidene fluoride as fillers has been established. Based on the heterogeneity coefficient values of the obtained polymer compositions, it was determined that the distribution quality of silica gel in fluoropolymers using the conventional mixing method in a high-speed mechanical mixer is moderate. To improve this, a method for obtaining polymer composites based on fluoropolymers and silica gel has been proposed, involving the in situ combination of the initial polymer composite components during the filler synthesis process. The polymer composites obtained using this method demonstrate 55–60% better distribution quality than those produced by the conventional approach. The basic physicomechanical properties (density, yield stress, compressive modulus, and hardness) of the developed polymer composites were determined, revealing a clear correlation between these properties and the quality of silica gel distribution in fluoropolymers. Specifically, materials obtained via the in situ combination method exhibit physicomechanical property levels that are 5–20% higher than those of composites produced using the standard processing technique.

Keywords: fluoropolymers; silica gel; product processing; in situ combination; physicomechanical properties.

REFERENCES

1. Muhammad A, Rahman MR, Baini R, Bakri MKB. Applications of sustainable polymer composites in automobile and aerospace industry. In: Rahman MR, editor. *Woodhead publishing series in composites science and engineering, Advances in sustainable polymer composites*. 2021. p. 185-207. doi: 10.1016/B978-0-12-820338-5.00008-4.

2. Kaufman V, Briant CL. *Metallurgical design and industry. Prehistory to the space age*. Springer Cham; 2018. 383 p. doi: 10.1007/978-3-319-93755-7.

3. 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 Enterprise Technol*. 2021; 113: 24-29. doi: 10.15587/1729-4061.2021.243100.

4. Kabat OS, Kharchenko BG, Derkach OD, Artemchuk VV, Babenko VG. Polimernye kompozitsionnye materialy na osnove ftoroplasta i metod ikh polucheniya [Polymer composites based on fluoroplastic and method for the production thereof]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2019; (3): 116-122. doi: 10.32434/0321-4095-2019-124-3-116-122.

5. Drobniy JG. Fluorine-containing polymers. In: Gilbert M, editor. *Brydson's plastics materials* (eighth edition). 2017. p. 389-425. doi: 10.1016/B978-0-323-35824-8.00014-1.

6. Smith DW, Iacono ST, Iyer SS. *Handbook of fluoropolymer science and technology*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc; 2014. doi: 10.1002/9781118850220.

7. Sonawane A, Deshpande A, Chinchanikar S, Munde Y. Dry sliding wear characteristics of carbon filled polytetrafluoroethylene (PTFE) composite against aluminium 6061 alloy. *Mater Today Proc*. 2021; 44: 3888-3893. doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.929.

8. Fidan S, Korkusuz OB, Toker PO, Gulturk E, Ates BH, Sənmazcelik 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.

9. Wang G, Wang L, You J, Yang Y, Wang Y, Wang W, et al. Preparation of hollow silica/PTFE fiber membrane with excellent thermal insulation performance by electrospinning. *Appl Therm Eng*. 2024; 255: 123959. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123959.

10. Wang S, Su XL, Zheng WJ, Yang F, Li H, Zou W. Study on preparation of SiO_2/PTFE aerogel-like materials via atmospheric drying and their thermal insulation performance. *J Sol-Gel Sci Technol*. 2024; 109: 204-214. doi: 10.1007/s10971-023-06261-0.

11. Kabat OS, Heti KV, Kovalenko IL, Dudka AM. Fillers on the silica base for polymer composites of constructional purpose. *J Chem Technol*. 2019; 27(2): 247-254. doi: 10.15421/081925.

12. Kumar AM, Latthe SS, Sudhagar P, Obot IB, Gasem ZM. In-situ synthesis of hydrophobic SiO_2-PMMA composite for surface protective coatings: experimental and quantum chemical analysis. Polymer. 2015; 77: 79-86. doi: 10.1016/j.polymer.2015.09.030.

13. Pikula II, Kabat OS. Vyznachennya optymalnykh tehnologichnykh parametriv bryketuvannya ftorpolimeriv [Determination of optimal technological parameters of fluoropolymer briquetting]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2024; (2): 70-74. doi: 10.32434/0321-4095-2024-153-2-70-74.

14. Yeriomina YeA, Burya AI. Investigating the influence of overmolecular structure on the properties of metal-containing polymers. *Funct Mater*. 2020; 27(4): 781-785. doi: 10.15407/fm27.04.781.

15. Kabat O, Sytar V, Heti K, Artemchuk V. A method for obtaining a polymer composite based on aromatic polyamide and silicon dioxide. *J Chem Technol Metall*. 2021; 56(2): 283-288.