

Валерій ГОРДІЄНКО, д-р хім. наук, проф.
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Наталія ШАРКІНА, канд. хім. наук
e-mail: nosha@email.ua
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ВПЛИВ ВИСОКОДИСПЕРСНИХ КАРБІДІВ (Si, Ti, Mo) НА МОЛЕКУЛЯРНУ, НАДМОЛЕКУЛЯРНУ СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІЕТИЛЕНУ

Вступ. Дослідження молекулярної, надмолекулярної структури та фізико-механічних властивостей композиційних матеріалів, отриманих сумісним диспергуванням лінійного поліетилену і дисперсних карбідів силіцію, титану та молібдену на ексцентрикному вібротолі. Встановлення кореляції між структурою, твердістю і теплостійкістю композиційних матеріалів.

Методи. Сумісне диспергування ПЕ та карбідів силіцію, титану й молібдену дозволяє змінити молекулярну і кристалічну структури типового термопластичного полімеру в напрямі, необхідному для збільшення фізико-механічних характеристик композиційних матеріалів. Максимальне збільшення твердості на 33 МПа і теплостійкості на 31 К спостерігається з введенням у полімер 7 об. % SiC-д.

Результати. Первинним фактором, що визначає збільшення твердості і теплостійкості термопластичних композитів, є утворення хімічних зв'язків між компонентами системи: макромолекули полімера – високодисперсні карбіди. Такі зв'язки виникають під впливом механохімічного впливу при вібропомолі добавок карбідів з ПЕ та введенні їх у розплав полімера. У зв'язку з цим кристалізація хімічно прищеплених макромолекул ініціюється за більш високої температури, ніж у вихідному ПЕ й закінчується утворенням більш досконалої кристалічної структури полімеру. Водночас утворюються також міжмолекулярні шийки і просторова сітка в ПЕ.

Висновки. Перетворення у структурі термопласта, що кристалізується, супроводжуються збільшенням твердості і теплостійкості композиційних матеріалів.

Ключові слова: концентрація добавок, кількість прищепленого полімеру, вміст гель-фракції, ступінь кристалічності, фізико-механічні властивості.

Вступ

Одним з найбільш перспективних аспектів механохімічного впливу на термопластичні матеріали, що містять добавки неорганічної природи варто вважати модифікування структури та властивостей отриманих композиційних матеріалів (Gholami et al, 2018; Mohamed et al, 2019; Kashyap et al, 2021; Wang et al, 2023). Найбільш ефективно таке модифікування відбувається під час вальцювання та вібропомолу термопластичних систем (Chavarria et al, 2020; Li et al, 2007; Tjong et al, 2004).

Раніше було встановлено, що під час вібраційного подрібнення деяких неорганічних речовин у присутності ряду мономерів відбувається їхня полімеризація. Водночас здійснюється хімічне щеплення макромолекул на поверхні дисперсійних часточок неорганічних субстратів. Така взаємодія можлива внаслідок утворення макрорадикалів під час механічної деструкції компонентів системи: полімер-неорганічна добавка. Показано, що за сумісного диспергування поліетилену із сажею методом вібропомолу можлива кополімеризація цих компонентів з утворенням більш еластичних продуктів порівняно з механічною сумішшю поліетилену і сажі (Гордієнко, & Ковалева, 2017; Gordienko et al, 2017).

У цій роботі досліджений вплив сумісного диспергування лінійного поліетилену і високодисперсних карбідів на структуру (на різних рівнях її організації) і фізико-механічні властивості отриманих термопластичних матеріалів.

Методи

Об'єктом дослідження є порошкоподібний поліетилен (ПЕ) високої щільності (середньов'язкісна молекулярна маса $9,5 \times 10^4$, ступінь кристалічності 54 %). Як добавки використовували дисперсні карбіди силіцію, титану та молібдену (розмір часточок 3–10 мкм, питома поверхня < 20 м²/г). Для порівняння також використовувався нанорозмірний карбід силіцію, який найбільш ефективно впливає на структуру та властивості лінійного поліетилену.

Сумісне диспергування ПЕ й усіх вказаних карбідів робили в лабораторному ексцентриковому вібротолі за

кімнатної температури. Добавки карбідів у ПЕ складали 0,2–7,0 об. %.

З композицій, одержаних сумісним диспергуванням і гомогенізацією розплаву полімера з добавками карбідів у платографі Брабендера (40 хв за 453 К), методом гарячого пресування (тиск 35 МПа за температури 443 К протягом 20 хв) виготовляли зразки товщиною $1 \pm 0,05$ мм і $3 \pm 0,1$ мм. Так само обробляли полімер, що не має добавок карбідів. Визначення вмісту гель-фракції (зшитих макромолекул) і кількості прищепленого полімеру на часточках карбідів проводили шляхом екстракції незв'язаних макромолекул ПЕ та вільних часточок карбідів киплячим толуолом до сталої ваги залишку. Рентгенографічне дослідження кристалічної структури зразків ПЕ (ступінь кристалічності та висота складок кристалітів) здійснювали на дифрактометрі ДРОН-3.

Як фізико-механічні властивості композицій ПЕ з карбідами визначали твердість за Брінеллем і теплостійкість за Віка з навантаженням 1 кг на індентор площиною 1 мм² і швидкістю нагрівання 2 К/хв. Для розрахунку фізико-механічних характеристик композицій ПЕ використовували значення сім паралельних зразків.

Результати

Вплив добавок дисперсних карбідів на молекулярну структуру ПЕ можна встановити за кількістю прищепленого полімеру на часточках добавок і вмісту гель-фракції в композиціях, що не піддавалися і піддавалися сумісному диспергуванню компонентів. Для композицій ПЕ, що містять вихідні дисперсні карбіди (SiC-д, TiC-д, MoC-д) і не піддавалися сумісному диспергуванню з полімером, кількість прищеплених макромолекул ПЕ і вміст гель-фракції доволі незначний – 2–5 %. Водночас, після сумісного диспергування ПЕ і вихідних дисперсних карбідів Si, Ti, Mo спостерігається ефективне щеплення макромолекул полімеру до поверхні часточок карбідів за рахунок заміни іона водню у ПЕ на іон відповідного металу карбиду й утворення просторової сітки, що обумовлює гель-фракцію в композиційних матеріалах (табл. 1).

Таблиця 1

Вплив концентрації добавок (ϕ) карбідів Si, Ti, Mo на кількість прищепленого полімера (P) і вміст гель-фракції (G) у композиціях після сумісного диспергування компонентів

ϕ , %	P, %				G, %			
	SiC-н	SiC-д	TiC-д	MoC-д	SiC-н	SiC-д	TiC-д	MoC-д
0,2	7	5	3	3	5	4	2	2
0,5	12	14	13	12	10	12	11	10
1,0	18	20	19	18	14	16	14	12
3,0	22	25	23	21	18	21	18	17
5,0	28	30	28	26	23	25	23	21
7,0	35	36	34	33	28	31	30	28

Відхилення від стандартних значень P і G становить ± 1 %

Після спалювання гель-фракції за температури 873 K встановлено, що кількість прищепленого полімеру збільшується зі збільшенням концентрації нанорозмірних карбідів, досягаючи 33–36 % залежно від їхньої природи, при 7 % вмісті добавок. Подібна тенденція спостерігається із вмістом гель-фракції ПЕ в цих композиціях. Причому, вміст гель-фракції ПЕ в усіх випадках нижче, ніж кількість прищепленого полімеру на часточках карбідів, а ефективність цих процесів має тенденцію до зниження у ряду: SiC-д > TiC-д > MoC-д.

Максимальні значення прищепленого полімеру й гель-фракції ($P = 36$ %, $G = 31$ %) спостерігається для ПЕ, що містить 7 об.% дисперсного SiC-д. Такі значення прищепленого полімеру та вміст гель-фракції не досягають навіть під час додавання в ПЕ такої самої кількості нанорозмірного карбиду силіцію. Окрім того, сумісне диспергування ПЕ з нанорозмірним карбідом силіцію (SiC-н) також показує більш низькі значення P і G в інтервалі концентрацій добавки 0,5–7,0 % порівняно з цими параметрами композицій після сумісного диспергування систем:

ПЕ – дисперсний SiC-д. такі зміни в молекулярній структурі композицій ПЕ, що містять карбіди, у процесі сумісного диспергування компонентів може обумовлюватись утворенням більш маленьких, впритул до нанорозмірних, часточок карбідів, які мають свіжоутворену поверхню. Вочевидь, під час сумісного вібропомолу ПЕ з карбідами вище температури склоутворення та нижче температури плавлення полімеру, відбувається хімічне щеплення макромолекул на свіжій поверхні часточок карбідів. Цей ефект може посилюватися у процесі подальшого термомеханічного впливу в розплаві ПЕ з утворенням просторової сітки полімеру, що містить хімічно прищеплені часточки карбідів.

Було зроблено припущення, що кристалізація лінійного ПЕ може початися з макромолекул, хімічно зв'язаних з поверхнею твердих дисперсних часточок. Це припущення доведено при кристалізації лінійного ПЕ з нанорозмірними часточками карбідів силіцію. У цій роботі вплив сумісного диспергування полімера і карбідів на параметри кристалічної структури ПЕ наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Вплив концентрації добавок (ϕ) карбідів на параметри кристалічної структури ПЕ: чисельник – без сумісного диспергування компонентів, знаменник – після сумісного диспергування компонентів

Параметри структури	Добавка	ϕ , %						
		0	0,2	0,5	1,0	3,0	5,0	7,0
K, %	SiC-н	54	58	65	64	63	62	61
		54	58	66	66	65	63	62
	SiC-д	54	56	56	56	54	54	52
		54	60	66	68	66	64	64
	TiC-д	54	55	55	56	54	53	52
		54	58	65	67	65	63	63
	MoC-д	54	54	54	54	53	52	52
		54	56	63	65	63	61	60
L_{002} , нм	SiC-н	20,0	23,5	24,0	23,0	23,0	22,5	22,0
		20,0	23,0	24,0	24,0	24,0	23,0	23,0
	SiC-д	20,0	20,0	20,5	21,0	20,5	20,5	20,0
		20,0	21,0	22,0	24,5	23,0	23,0	22,0
	TiC-д	20,0	20,0	20,0	20,5	20,0	20,0	19,5
		20,0	21,0	22,0	23,0	22,5	22,0	21,5
	MoC-д	20,0	20,0	20,0	20,5	20,0	19,5	19,0
		20,0	21,0	22,0	22,5	22,0	21,5	21,0

Примітки: ϕ – концентрація добавок, K – ступінь кристалічності, L_{002} – висота складки кристалітів

Довірчий інтервал для K і L_{002} становить ± 1 %

Як можна побачити, сумісне диспергування ПЕ, що містить SiC-н, мало впливає на параметри кристалічної структури полімера. В обох випадках для систем ПЕ – SiC-н ступінь кристалічності і висота складки кристалітів полімера збільшують свої значення в ділянці концентрацій добавки карбіда 0,5–1,0 об.% найбільш ефективно, а зі збільшенням вмісту SiC-н до 7 об.% зазначені параметри трохи знижуються, не доходячи до значення вихідного полімеру. Практично SiC-н у диспергованому й недиспергованому з ПЕ вигляді виступає структурно-активним наповнювачем. Вихідні дисперсні карбіди Si, Ti, Mo не є такими наповнювачами.

Водночас, під час кристалізації полімеру у присутності добавок карбідів силіцію, титану та молібдену, диспергованих з ПЕ, відбувається одночасне збільшення ступеня кристалічності полімера та висоти складки його кристалітів. Найбільш ефективне збільшення параметрів кристалічної структури ПЕ спостерігається при вмісті 1,0 об.% добавок карбідів у полімері. Збільшення вмісту карбідів знижує ефективність впливу цих часточок на кристалічну структуру ПЕ. За ефективністю впливу на кристалічну структуру поліетилену, дисперговані з полімером карбіди розподіляються в такій послідовності: SiC-д > TiC-д > MoC-д, що корелює зі ступенем щеплення макромолекул ПЕ на поверхні часточок добавок і

вмістом гель-фракції полімеру (порівняйте табл. 1 і 2). Так, максимальне збільшення ступеня кристалічності (на 14 %) і висоти складки кристалітів (на 4,5 нм) має місце у зразках ПЕ, що містять 1,0 об.% диспергованого SiC-д. Вочевидь, дія часточок карбідів, як ініціаторів кристалізації ПЕ, реалізується лише у випадку хімічного щеплення макромолекул на поверхні часточок добавок. Ініціатори кристалізації сприяють утворенню більш термодинамічно рівноважної й довершеної кристалічної структури полімеру. Варто також врахувати, що дисперговані часточки карбідів можуть бути співмірні з висотою складки кристалітів ПЕ. Це значною мірою повинно впливати на кінетику і термодинаміку кристалізації полімеру та його надмолекулярну структуру. Збільшення в полімері вмісту гель-фракції (зшитих макромолекул), що локалізуються в аморфних ділянках ПЕ, повинно ускладнювати кристалізацію термопластичного матеріалу, що і спостерігається зі збільшенням концентрації карбідів у полімері

(табл. 1, 2). Порівнюючи дані табл. 2 і результати інших робіт, можна побачити, що дисперговані з ПЕ карбіди Si, Ti, Mo не поступаються за ефективністю модифікації кристалічної структури полімеру порівняно з нанорозмірними часточками тих самих карбідів.

Зміна молекулярної та кристалічної структури ПЕ, які відбулися під час сумісного диспергування полімеру з карбідами, знайшли своє відображення у зміні твердості та теплостійкості термопластичних матеріалів (рис. 1). Твердість термопластичних матеріалів із вмістом карбідів до 1,0 об.% різко збільшується, в особливості для SiC – на 26–28 МПа, що обумовлено більш високими параметрами кристалічної структури ПЕ (табл. 2). Подальше збільшення вмісту карбідів у полімері до 7 об.% збільшує значення твердості термопластичних матеріалів менш значне – на 7–8 МПа, незважаючи на деяке зниження параметрів кристалічної структури ПЕ (табл. 2).

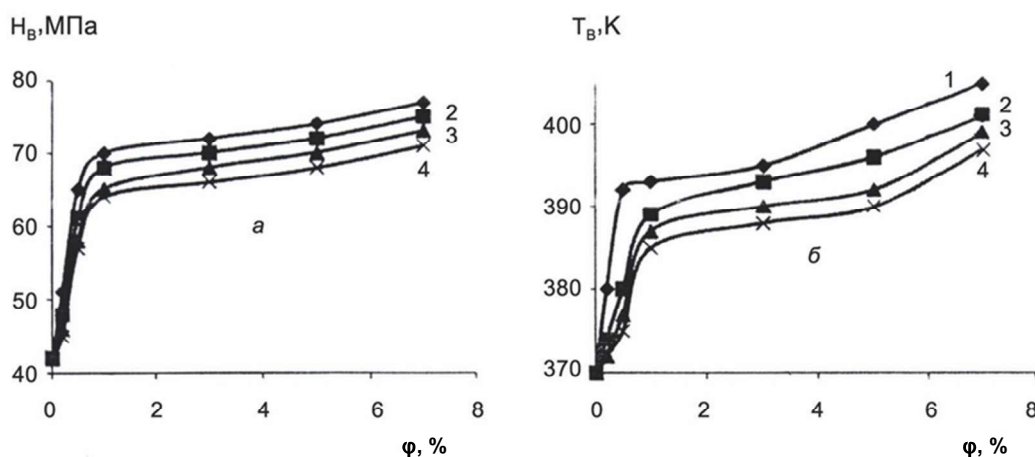


Рис. 1. Залежність твердості за Брінеллем H_B (а) і теплостійкості за Віка T_B (б) матеріалів від вмісту (ϕ) карбідів: SiC-н (1), SiC-д (2), TiC-д (3), MoC-д (4)

Такий ефект найвірогідніше пов'язаний з тим, що зі збільшенням вмісту карбідів у полімері, у збільшенні твердості композиційних матеріалів дається взнаки наявності зшитих макромолекул, хімічно прищеплених на поверхні високодисперсних часточок, які концентруються, у більшості випадків, в аморфних ділянках термопласта, що кристалізується. Цей внесок у збільшення твердості термопластичних матеріалів виявляється більш значущим, ніж деяке зниження параметрів кристалічної структури ПЕ, так як пов'язаний з армуючим впливом аморфних ділянок полімерів, що кристалізуються.

Зміна теплостійкості термопластичних матеріалів залежно від вмісту карбідів має характер схожий на зміну твердості цих матеріалів (рис. 1). Найбільш ефективно на збільшення температури розм'якшення ПЕ впливає карбід силіцію: додавання 1,0 об.% SiC збільшує теплостійкість на 19–23 К, а в діапазоні 1,0–7,0 об.% лише на 12 К. Збільшення теплостійкості лінійного поліетилену з додаванням досліджуваних високодисперсних карбідів, в основному, корелює зі зміною молекулярної і кристалічної структури полімера.

Дискусія і висновки

З наведених вище даних бачимо, що сумісне диспергування ПЕ та карбідів силіцію, титану й молібдену дозволяє змінити молекулярну та кристалічну структури типового термопластичного полімеру в напрямі, необхідному для збільшення фізико-механічних характеристик композиційних матеріалів. Максимальне збільшення твердості на 33 МПа і теплостійкості на 31 К спостерігається із введенням у полімер 7 об.% SiC-д. Первинним

фактором, що визначає збільшення твердості і теплостійкості термопластичних композитів, є утворення хімічних зв'язків між компонентами системи: макромолекули полімеру – високодисперсні карбіди. Такі зв'язки виникають під впливом механохімічного впливу під час вібропомолу добавок карбідів з ПЕ та введенні їх у розплав полімеру. У зв'язку з цим кристалізація хімічно прищеплених макромолекул ініціюється за більш високої температури, ніж у вихідному ПЕ й закінчується утворенням більш досконалої кристалічної структури полімеру. Водночас утворюються також міжмолекулярні зв'язки та просторова сітка в ПЕ. Такі перетворення у структурі термопласта, що кристалізується, супроводжуються збільшенням твердості й теплостійкості композиційних матеріалів. Детальний порівняльний аналіз цієї роботи й тих, що опубліковані раніше, свідчить про те, що одержання композиційних матеріалів на основі термопластів методом сумісного диспергування компонентів переважно, ніж шляхом безпосереднього введення в розплав полімерів нанорозмірних добавок неорганічної природи.

Результати цієї роботи варто використовувати під час одержання полімерних композитів на основі термопластів, що кристалізуються, для підвищення їхніх фізико-механічних характеристик. Можна передбачити, що найбільш ефективною зміною структури термопластичних матеріалів під час сумісного диспергування компонентів буде утворення "монолітних композитів", що базуються на утворенні своєрідних "мінерально-органічних кополімерів". Такі матеріали повинні мати унікальні властивості внаслідок структурної, термодинамічної та

кінетичної активностей високодисперсних добавок неорганічної природи в полімерах, що кристалізуються (Гордієнко, & Ковалева, 2017; Gordienko et al, 2017).

Досліджена молекулярна, надмолекулярна структура та фізико-механічні властивості композиційних матеріалів, що одержані сумісним диспергуванням лінійного ПЕ й дисперсних карбідів силіцію, титану та молибдену на ексцентриковому вібротолі. Встановлена кореляція між структурою, твердістю та теплостійкістю композиційних матеріалів.

Внесок авторів: Гордієнко Валерій – методологія, формальний аналіз, написання (оригінальна чернетка), валідація даних; Шаркіна Наталія – концептуалізація, формальний аналіз, написання (перегляд і редагування).

Подяки. Автори висловлюють подяку акад. Ліпатову Ю.С. та проф. Соломку В.П., робота яких надихнула авторів на проведення цих досліджень.

Джерела фінансування. Це дослідження не отримало гранту від установ у публічному, комерційному або некомерційному секторах.

Список використаних джерел

- Гордієнко, В. П., & Ковалева, Г. Н. (2017). *Пластичні маси*, 1–2, 40–43.
- Chavarria, F. J., Rangel-Mendez, J. R., Aguilar-Vega, M. J., & Monroy-Gómez, J. M. (2020). *Mechanical and thermal properties of high-density polyethylene/titanium carbide (HDPE/TiC) nanocomposites*. *Composites Part B: Engineering*, 185, 107739. <http://doi:10.1016/j.compositesb.2020.107739>
- Gholami, H., & Garmabi, H. (2018). Structure and thermo-mechanical properties of polyethylene/silicon carbide nanocomposites prepared by melt blending. *Polymer Engineering & Science*, 58(3), 405–412. <http://doi:10.1002/pen.24584>
- Gordienko, V., & Kasperskyi, A. (2017). The structure and thermomechanical analysis of thermoplastic systems: polyethylene – nanosized carbides, *Taylor and Francis, Engineering Studies*, 9, 3(2), 457–461.
- Kashyap, S., & Gadhamshetty, V. (2021). Effect of molybdenum disulfide and carbide on the physical and mechanical properties of polyethylene composites. *Journal of Materials Science*, 56(18), 11130–11142. <http://doi:10.1007/s10853-021-06041-3>
- Li, C., & Zhang, D. (2007). Effect of nano-SiC particles on the crystallization and melting behaviors of ultrahigh molecular weight polyethylene. *Materials Letters*, 61(2), 522–525. <http://doi:10.1016/j.matlet.2006.05.021>

Valery GORDIENKO, DSc (Chem.), Prof.
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Nataliia SHARKINA, PhD (Chem.), Senior Researcher
e-mail: nosha@email.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

INFLUENCE OF HIGHLY DISPERSED CARBIDES (Si, Ti, Mo) ON THE MOLECULAR, SUPRAMOLECULAR STRUCTURE AND PROPERTIES OF POLYETHYLENE

Background. The molecular, supramolecular structure and physical-mechanical properties of composite materials obtained by dispersing the combined linear polyethylene and particulate silicon carbide, titanium and molybdenum exscentric vibrating mill. The correlation between the structure, hardness and heat resistance of composite materials.

Methods. Co-dispersion of polyethylene and silicon, titanium, and molybdenum carbides allows changing the molecular and crystal structures of a typical thermoplastic polymer in the direction necessary to increase the physical and mechanical characteristics of composite materials. The maximum increase in hardness by 33 MPa and heat resistance by 31 K is observed when 7 vol.% SiC-d is introduced into the polymer.

Results. The primary factor determining the increase in hardness and heat resistance of thermoplastic composites is the formation of chemical bonds between the components of the system: polymer macromolecules — highly dispersed carbides. Such bonds arise under the influence of mechanochemical effects during vibration grinding of carbide additives from PE and their introduction into the polymer melt. In connection with that, the crystallization of chemically grafted macromolecules is initiated at a higher temperature than in the original PE and ends with the formation of a more perfect crystalline structure of the polymer. At the same time, intermolecular crosslinks and a spatial network in PE are also formed.

Conclusions. Such transformations in the structure of the crystallized thermoplastic are accompanied by an increase in the hardness and heat resistance of the composite materials.

Keywords: Concentration of additives, amount of grafted polymer, gel fraction content, degree of crystallinity, physical and mechanical properties.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Mohamed, N. F., El-Nemr, F. A., & Tawfik, M. E. (2019). Impact of nano-titanium carbide (TiC) on the structural, thermal, and mechanical behavior of low-density polyethylene (LDPE). *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 25(2), E359–E367. <http://doi:10.1002/vnl.21666>

Tjong, S. C., & Ma, Z. Y. (2004). Microstructural and mechanical characteristics of materials based on titanium carbide reinforced polymer composites. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 45(1–2), 1–35. <http://doi:10.1016/j.msar.2004.03.001>

Wang, X., & Zeng, S. (2023). Enhanced wear resistance and mechanical properties of high-density polyethylene composites reinforced by molybdenum carbide (Mo₂C) nanoparticles. *Wear*, 520, 204683. <http://doi:10.1016/j.wear.2023.204683>

References

- Chavarria, F. J., Rangel-Mendez, J. R., Aguilar-Vega, M. J., & Monroy-Gómez, J. M. (2020). *Mechanical and thermal properties of high-density polyethylene/titanium carbide (HDPE/TiC) nanocomposites*. *Composites Part B: Engineering*, 185, 107739. <http://doi:10.1016/j.compositesb.2020.107739>
- Gholami, H., & Garmabi, H. (2018). Structure and thermo-mechanical properties of polyethylene/silicon carbide nanocomposites prepared by melt blending. *Polymer Engineering & Science*, 58(3), 405–412. <http://doi:10.1002/pen.24584>
- Gordienko V., & Kovaleva G. (2017). *Plastics*, 1–2, 40–43.
- Gordienko V., & Kasperskyi A. (2017). The structure and thermomechanical analysis of thermoplastic systems: polyethylene – nanosized carbides. *Taylor and Francis, Engineering Studies*, 9, 3(2), 457–461.
- Kashyap, S., & Gadhamshetty, V. (2021). Effect of molybdenum disulfide and carbide on the physical and mechanical properties of polyethylene composites. *Journal of Materials Science*, 56(18), 11130–11142. <http://doi:10.1007/s10853-021-06041-3>
- Li, C., & Zhang, D. (2007). Effect of nano-SiC particles on the crystallization and melting behaviors of ultrahigh molecular weight polyethylene. *Materials Letters*, 61(2), 522–525. <http://doi:10.1016/j.matlet.2006.05.021>
- Mohamed, N. F., El-Nemr, F. A., & Tawfik, M. E. (2019). Impact of nano-titanium carbide (TiC) on the structural, thermal, and mechanical behavior of low-density polyethylene (LDPE). *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 25(2), E359–E367. <http://doi:10.1002/vnl.21666>
- Tjong, S. C., & Ma, Z. Y. (2004). Microstructural and mechanical characteristics of materials based on titanium carbide reinforced polymer composites. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 45(1–2), 1–35. <http://doi:10.1016/j.msar.2004.03.001>
- Wang, X., & Zeng, S. (2023). Enhanced wear resistance and mechanical properties of high-density polyethylene composites reinforced by molybdenum carbide (Mo₂C) nanoparticles. *Wear*, 520, 204683. <http://doi:10.1016/j.wear.2023.204683>

Отримано редакцією журналу / Received: 14.01.25

Прорецензовано / Revised: 06.02.25

Схвалено до друку / Accepted: 19.02.25