

УДК 620.17

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6\(37\).1.9-15](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).1.9-15)

О.Д. Деркач, доц., канд. техн. наук, Д.О. Макаренко, доц., канд. техн. наук,
Є.С. Муранов

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

e-mail: Derkach_dsau@i.ua, flymakd@gmail.com

Вплив графіту на фізико-механічні характеристики та трибологічні властивості вторинного поліетилену

Встановлено, що введення графіту в кількості 2 мас. %, в структуру вторинного поліетилену, провокує зростання напруження міцності та величини відносного видовження при розриві, на 7,7 % та 19,9 % відповідно. Виявлено, що введення графіту в структуру вторинного поліетилену призводить до підвищення мікротвердості отриманих матеріалів. Встановлено, що вторинний поліетилен, наповнений 2 % мас. графітом, забезпечує працездатність в режимі тертя без мащення за критерієм $PV \leq 0,5$ МПа м/с. **вторинний поліетилен, графіт, фізико-механічні характеристики, трибологічні властивості, величина зносу**

Постановка проблеми. Однією з умов промислового виробництва надійних механізмів та машин є використання високоякісних конструкційних матеріалів. Сьогодні вагомий внесок у підвищенні надійності техніки має використання конструкційних матеріалів неметалевого походження. У 2021 році близько 65 % первинних пластиків Україна імпортувала [1]. У структурі хімічного виробництва України, в 2021 році, виробництво первинних пластиків становило всього 14 %. При цьому, в структурі виробництва продукції основної хімії, обсяги виробництва пластмасових виробів, склали більше 80 % [1]. Сьогодні, промисловість змушена шукати такі матеріали в інших країнах, зокрема країнах ЄС. При цьому, їх вартість значно вища, що в свою чергу, впливає на собівартість готової продукції. Одним із шляхів безперебійного забезпечення промисловості полімерно-композитними матеріалами (ПКМ) є їх рециклінг (повторна переробка і використання). Вторинні пластики, зазвичай, мають гірші фізико-механічні характеристики, у порівнянні з первинними матеріалами. Тому, існує необхідність адаптації їх характеристик шляхом введення в їх структуру модифікаторів. Це дозволить зменшити імпортозалежність та гарантувати економічну безпеку промисловості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасна промисловість випускає значне різноманіття виробів з полімерів або ПКМ, починаючи з предметів побуту, і закінчуючи елементами для авіації [2, 3]. При цьому, термін служби більшості предметів побуту та пакувальних виробів з ПКМ незначний. Найменший термін використання мають пакувальні матеріали та тара з поліетилену: пакети, біг-беги, стрічки, упаковки для харчових та промислових рідин та ін. Відходи пластику відповідно до діючого закону України про обов'язкове сортування побутових відходів, необхідно сортувати та збирати окремо, і відправляти на повторну переробку. Проте, більшість з таких відходів накопичується на звалищах, що може загрожувати екологічною катастрофою. Тому, актуальним завданням сьогодення є повторне використання відходів пластиків, в тому числі з точки зору отримання прибутку [4]. Багато наукових робіт направлені на повторну переробку дорогих конструкційних

ПКМ, зокрема вуглепластиків, що обумовлено саме їх вартістю [5]. При цьому, запропоновані технології отримання вуглецевих волокон, з вторинних ПКМ, засновані або на процесі піролізу, або використанню хімічних реагентів потребують спеціального обладнання та умов роботи. Тому, повторна переробка таких матеріалів має локальний характер. Низька вартість та значні обсяги вторинного поліетилену, в сукупності з простотою технології переробки, створює передумови для його рециклінгу. В роботі [6] виконані дослідження технологічного процесу рециклінгу пластиків. Проте, у вказаній науковій роботі розглянуто відомі технології переробки пластиків. В той час, як дослідженням впливу запропонованих технологій на характеристики та властивості одержаних матеріалів не приділено достатньої уваги. Одним із перспективних напрямків повторного використання пластиків є додавання їх при будівництві доріг [7-8]. Проте, в Україні ця технологія, поки що, не отримала широкого розповсюдження. Повторна переробка пластиків, зазвичай, призводить до зниження фізико-механічних характеристик та трибологічних властивостей одержаного матеріалу. Вирішити цей недолік можна шляхом введенням в структуру матриці матеріалу різноманітних модифікаторів [9, 10]. В роботі [9] запропоновано проводити легування поліетилену металевими матеріалами методом високоенергетичного механічного сплавлення, що дозволяє значно підвищити фізико-механічні характеристики та трибологічні властивості одержаних матеріалів. Дослідженнями в роботі [10] підтверджено ефективність армування поліетилену вуглецевими волокнами. Проте, у випадку з поліетиленом виникає невідповідність собівартості отриманого ПКМ та його сферою застосування.

Таким чином, існує необхідність у вирішенні задач щодо розробки технології переробки вторинного поліетилену, що має низьку собівартість, і забезпечує характеристики та властивості отриманих матеріалів на рівні, або навіть вищі, ніж у вихідного матеріалу. Одним із недорогих та ефективних модифікаторів для полімерів є графіт. Проте, існує необхідність у визначенні впливу його концентрації на характеристики та властивості ПКМ на основі вторинного поліетилену.

Постановка завдання. Мета роботи полягає у дослідженні впливу графіту на фізико-механічні характеристики та трибологічні властивості вторинного поліетилену. Для цього необхідно виконати дослідження фізико-механічних характеристик та трибологічних властивостей вихідного вторинного поліетилену на ПКМ на його основі.

Обладнання та методики досліджень. Введення графіту в структуру вторинного поліетилену проводили на двокомпонентному екструдері ЕКГ-45. Концентрація наповнювача становила 2 мас. %, 3 мас. % та 4 мас. %.

Визначення фізико-механічних характеристик. Випробовування на міцність за розтягу виконували на випробувальній машині FP-100/1 за ГОСТ 11262-80, тип зразка відповідав типорозміру 4.

Перед випробуванням на зразки наносили необхідні мітки відповідно до вимог ГОСТ 11262-80. Товщину і ширину зразків вимірювали в трьох місцях, посередині та на відстані 5 мм від виконаних міток. На основі одержаних вимірів обчислювали середні арифметичні величини, за якими визначали початковий поперечний переріз F_0 . Зразки закріплювали у затискачах машини FP-100/1 відповідно до нанесених міток, забезпечуючи розташування затискачів та зразку в одній площині. У випадку руйнування зразків за межами робочої зони – результати не враховують.

Режими випробування:

- шкала навантаження – 1 кН;
- швидкість руху траверси 180 мм / хв;
- швидкість руху діаграмного паперу – 300 мм / хв.

Величина напруження міцності за розтягу визначається за формулою [11]:

$$\sigma_{\max} = P_{\max} / F_0, \quad (1)$$

де $P_{\max}$ – найбільше навантаження при випробуванні, Н;

F_0 – площа початкового поперечного перерізу зразка, мм².

Напруження міцності при розриві визначається за формулою:

$$\sigma_p = P_p / F_0, \quad (2)$$

де P_p – навантаження в момент руйнування зразка, Н;

F_0 – площа початкового поперечного перерізу зразка, мм².

Відносне видовження, у відсотках, при максимальному навантаженні розраховували за формулою:

$$\varepsilon_{\max} = (\Delta l_{\max} / l_0) \cdot 100\%, \quad (3)$$

де $\Delta l_{\max}$ – зміна розрахункової довжини зразка в момент досягнення максимального навантаження, мм;

l_0 – початкова розрахункова довжина зразку, мм.

Відносне видовження при розриві:

$$\varepsilon_p = (\Delta l_p / l_0) \cdot 100\%, \quad (4)$$

де Δl_p – зміна розрахункової довжини зразка в момент досягнення максимального навантаження, мм;

l_0 – початкова розрахункова довжина зразку, мм.

За результатами 7 випробувань приймали середнє арифметичне значення величин, що визначаються.

Мікротвердість матеріалів досліджували за Шором, шкала D (метод вдавлювання).

Дослідження трибологічних властивостей виконано на машині для дослідження тертя та зношування СМТ-1 за схемою «диск-колодка» та відомою методикою [12]. Режимі дослідження наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Режимі дослідження трибологічних властивостей матеріалів на основі вторинного поліетилену

Показник	Рівень		
	-1	0	+1
P, МПа	0,5	0,75	1
V, м/с	0,4	0,45	0,5

Джерело: розроблено авторами

Вагову величину зносу зразків визначали на аналітичних терезах METRINCO AB224 (дискретність – 0,0001 г) шляхом зважування до і після випробування.

Визначення температури в околі тертя виконували за допомогою електронного логера Easy Logger USB. Інтервал фіксації значення температури – 1 секунда.

Дослідження поверхонь тертя виконували на мікроскопі МБИ-6 з використання цифрової окулярної камери SIGETA MDC-500 5.0MP та ПК.

Виклад основного матеріалу. Визначення фізико-механічних характеристик. Результати дослідження впливу графіту на характеристики вторинного поліетилену наведені в табл. 2. Встановлено, що введення графіту, концентрацією 2 мас. %, в структуру вторинного поліетилену, призводить до зростання напруження міцності та

відносного видовження при максимальному навантаженні на 3 % та 1,2 %. При цьому, вказані показники при розриві зростають більш суттєво – на 7,7 % та 19,9 % відповідно.

Таблиця 2 – Характеристики вторинного поліетилену, наповненого графітом

Вміст графіту, мас. %	Відносне видовження, %		Напруження міцності, МПа	
	при максимальному навантаженні, $\epsilon_{\max}$	при руйнуванні, ϵ_p	при максимальному навантаженні, $\sigma_{\max}$	при розриві, σ_p
0	18,73	11,7	23,0	297,2
2	18,95	12,6	23,7	356,4
3	18,44	12,0	22,0	268,4
4	18,12	11,4	20,4	174,6

Джерело: розроблено авторами

Збільшення концентрації графіту у структурі вторинного поліетилену до 3 мас. % призводить до зниження всіх досліджуваних характеристик, у порівнянні з ненаповненим матеріалом, окрім відносного видовження при руйнуванні. При введенні в структуру поліетилену графіту у кількості 4 мас. % спостерігається зниження всіх досліджуваних показників.

Отримані результати (рис. 1) свідчать, що введення графіту, в структуру вторинного поліетилену, незалежно від його обсягу, призводить до підвищення мікротвердості одержаних ПКМ.

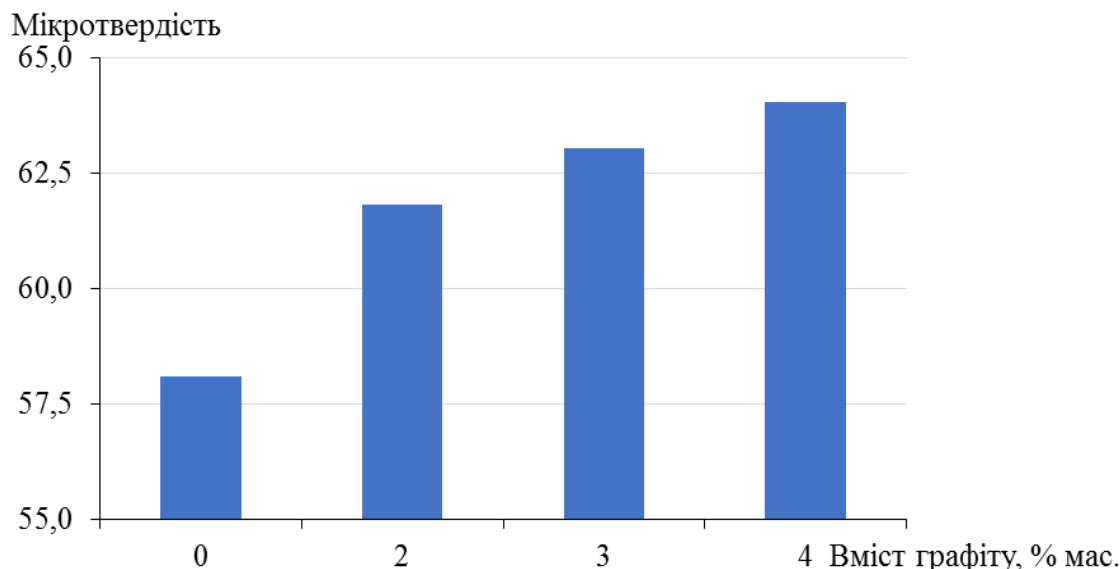


Рисунок 1 – Залежність мікротвердості (за Шором D) від вмісту графіту у вторинному поліетилені

Джерело: розроблено авторами

За умови введення графіту до 2 мас. % спостерігається зростання мікротвердості на 6,4 %, в той час як за концентрації 4 мас. % цей показник зростає на 10,3 %. Проте, з врахуванням отриманих результатів табл. 2, рекомендується ПКМ для подальшого дослідження трибологічних властивостей з концентрацією графіту 2 мас. %. Насамперед, це пов'язано з необхідністю забезпечення міцнісних характеристик ПКМ.

Дослідження трибологічних властивостей. Виявлено, що за обраних режимів тертя (табл. 1), лінійна швидкість ковзання та тиск не мають суттєвого впливу на

величину зносу. Встановлено, що температура в околі тертя, за умови тертя без мащення по сталі 45 та режимів наведених в табл. 1, як ненаповненого вторинного поліетилену, так і ПКМ на його основі, не перевищувала 69 °С. Встановлено, що величина зносу для всіх досліджуваних матеріалів (шлях тертя 3000 м), не перевищувала 0,0002 г, що становить 0,015 % від початкової маси зразків. Перевищення величини тиску чи лінійної швидкості вище вказаних в табл. 1, призводить до підвищення температури в околі тертя до 72...73 °С та катастрофічного зносу зразків (рис. 2).

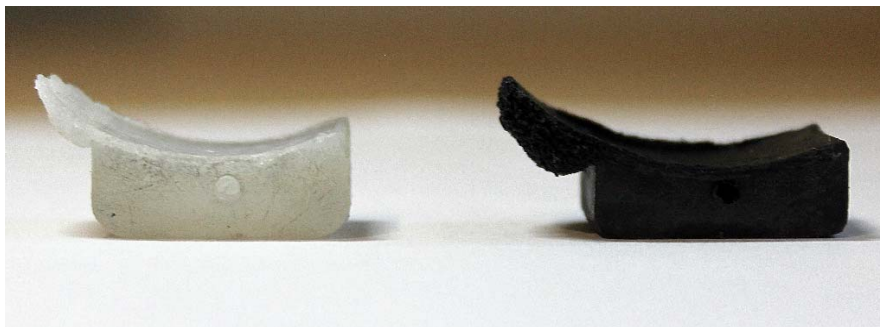
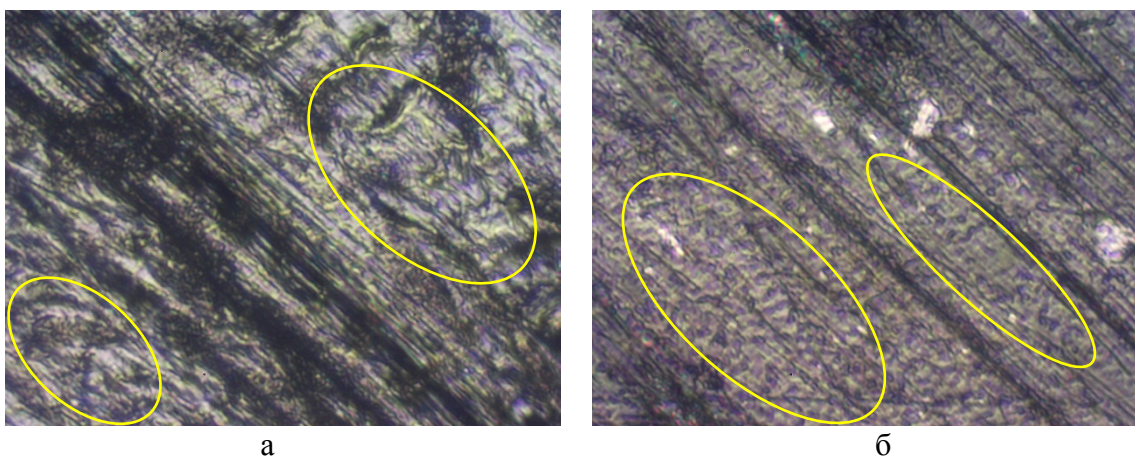


Рисунок 2 – Зразки, що мали катастрофічний знос (при перевищенні температури в зоні тертя 72 °С)
Джерело: розроблено авторами

На поверхнях тертя зразків, за умови досягнення температури в околі тертя 69...70 °С спостерігається утворення локул теплового накопичення, що провокує початок плавлення робочої поверхні зразків (рис. 3).



а – ненаповнений вторинний поліетилен; б – вторинний поліетилен наповнений 2 мас. % графітом

Рисунок 3 – Мікрофото поверхонь зразків після тертя ($\times 120$)

Джерело: розроблено авторами

Тому, особливу увагу, при використанні вторинного поліетилену в рухомих з'єднаннях необхідно приділити саме температурному режиму роботи трибоспряження.

Висновки. Спираючись на отримані результати, можна рекомендувати введення графіту в обсязі 2 мас. %. при переробці вторинного поліетилену. Одержаний ПКМ забезпечує працездатність за критерієм $PV \leq 0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м/с}$, за умови не перевищення тиску 1 МПа, лінійної швидкості – 0,5 м/с. Встановлено, що введення графіту дозволяє помірно підвищити фізико-механічні та міцнісні характеристики одержаного матеріалу, у порівнянні з ненаповненим вторинним поліетиленом

Список літератури

1. Ковеня Т.В. Хімічна промисловість та хімічний ринок України у 2021 році: факти, оцінка стану, тенденції, прогноз. Аналітична записка. Черкаський НДІТЕХІМ, 2022. 69 с.
2. Tomasz Lusiak, Andrej Novák, Michal Janovec, Martin Bugaj. Measuring and Testing Composite Materials Used in Aircraft Construction. *Key Engineering Materials*. 2021. Vol. 904. 161-166. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.904.161>
3. Derkach O., Makarenko D., Velyka M., Shapoval O. Development of high accuracy of the copy soil system *International Scientific Journal*. – *Mechanization in agriculture & Conserving of the resources*. Year LXIII, Issue 5/2017. Sofia. 2017. p. 185-187.
4. Україна імпортує відходи з інших країн на мільярди: веб-сайт. URL: <https://www.epravda.com.ua/publications/2021/06/18/675131/> (дата звернення: 04.09.2022)
5. Тукачева К. О., Куликова Ю. В., Ильиных Г. В. Апробация различных реагентов для химического извлечения углеродного волокна из полимерных композиционных материалов // Бюллетень науки и практики. 2018. Т. 4. №12. С. 42-50. Режим доступа: <http://www.bulletennauki.com/12-72>
6. Рахимов М.А., Рахимова Г.М., Иманов Е.М. Проблемы утилизации полимерных отходов // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 8-2. С. 331-334; URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=34554> (дата звернення: 23.08.2020)
7. Galyna Strap, Olena Astakhova, Olexander Lazorko, Oleh Shyshchak and Michael Bratychak. Modified Phenol-Formaldehyde Resins and their Application in Bitumen-Polymeric Mixtures. *Chemistry & Chemical Technology* Vol. 7, No. 3, 2013. <https://doi.org/10.23939/chcht07.03.279>.
8. Osman Gulseven, Shaimaa Ashkanani, Sarah Abdullah, Hawraa Ismaeil, Haneen Alkandari, Mariam Baroun. A sustainable model for enhancing road quality with recycled plastic bags. *Kuwait Journal of Science*. 2019. 46(4): pp. 112-119
9. Borges J., Mugnaine M., Camilo A., Borges F., Cintho O. Ultra high molecular weight polyethylene doped with iron through high energy mechanical alloying. *Revista Materia*. V.25 N.03. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200003.1091>
10. Pearson A., Liao W., Kazemi Y., Duncan M., Slingerland E. et al. Fiber-matrix adhesion between high-density polyethylene and carbon fiber. *Polymer Testing*. 2022. vol. 105, p. 107423. doi: 10.1016/j.polymertesting.2021.107423
11. Шидловський М.С., Бабенко А.Є., Боронко О.О., Заховайко О.П., Трубочев С.І. Нові матеріали: частина 2 - Експериментальні методи досліджень механічних властивостей конструкційних полімерів та пластмас. [Текст]: Навчальний посібник. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 265 с.
12. V. Aulin., O. Derkach., D. Makarenko, A. Hrinkiv, A. Pankov, A. Tykhyi. Analysis of tribological efficiency of movable junctions “polymeric-composite materials – steel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4, Issue 12 (100). P. 6-15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176845>.

References

1. Kovenia T. (2022). Chemical industry and chemical market of Ukraine in 2021: facts, state assessment, trends, forecast [Khimichna promyslovisht ta khimichnyi rynok Ukrainy u 2021 rotsi: fakty, otsinka stanu, tendentsii, prohnz]. Cherkasy: Cherkaskyi NDITEKhIM [in Ukrainian].
2. Tomasz, L., Andrej, N., Michal, J., Martin, B. (2021). Measuring and Testing Composite Materials Used in Aircraft Construction. *Key Engineering Materials*, Vol. 904, 161-166. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.904.161> [in English].
3. Derkach O., Makarenko D., Velyka M., Shapoval O. (2017). Development of high accuracy of the copy soil system *International Scientific Journal*. – *Mechanization in agriculture & Conserving of the resources*. – Year LXIII, Issue 5/2017. – Sofia. – 2017. – P. 185-187 [in English].
4. Ukraina importuie vidkhody z inshykh krain na miliardy: veb-sait. [Ukraine imports billions worth of waste from other countries: website] URL: <https://www.epravda.com.ua/publications/2021/06/18/675131/> [in Ukrainian].
5. Tukacheva, K.O., Kulykova, Yu.V., & Ylynykh, H.V. (2018). Aprobatsiya razlichnykh reagentov dlya khimicheskogo izvlecheniya uglerodnogo volokna iz polimernykh kompozitsionnykh materialov. [Approbation of various reagents for the chemical extraction of carbon fiber from polymer composite materials]. *Byulleten' nauki i praktiki*, 4, 12, 42-50.
6. Rakhimov, M.A., Rakhimova, G.M., & Imanov, Ye.M. (2014). Problemy utilizatsii polimernykh otkhodov [Problems of recycling polymer waste]. *Fundamental'nyye issledovaniya*. – *Fundamental Research*, 8-2, 331-334. URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=34554> [in Russian]

7. Strap, G., Astakhova, O., Lazorko, O., Shyshchak O., & Bratychak. M. (2013). Modified Phenol-Formaldehyde Resins and their Application in Bitumen-Polymeric Mixtures. *Chemistry & Chemical Technology*. Vol. 7, 3, <https://doi.org/10.23939/chcht07.03.279> [in English].
8. Gulseven, O., Ashkanani, S., Abdullah, S., Ismaeil, H., Alkandari, H., & Baroun, M. (2019). A sustainable model for enhancing road quality with recycled plastic bags. *Kuwait Journal of Science*, 46(4), 112-119 [in English].
9. Borges, J., Mugnaine, M., Camilo, A., Borges, F., & Cintho, O. (2020). Ultra high molecular weight polyethylene doped with iron through high energy mechanical alloying. *Revista Materia*. V.25 N.03. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200003.1091> [in English].
10. Pearson, A., Liao, W., Kazemi, Y., Duncan, M., Slingerland, E. et al. (2022). Fiber-matrix adhesion between high-density polyethylene and carbon fiber. *Polymer Testing*, vol. 105, 107423. doi: 10.1016/j.polymertesting.2021.107423 [in English].
11. Shydlovskiy, M.S., Babenko, A.Ie., Boronko, O.O., Zakhovaiko, O.P. & Trubachev S.I. (2017). *Novi materialy: chastyna 2 - Eksperymentalni metody doslidzhen mekhanichnykh vlastyvostei konstruktsiinykh polimeriv ta plastmas. [New materials: part 2 - Experimental methods of researching the mechanical properties of structural polymers and plastics]*. K.: KPI im. Ihoria Sikorskoho [in Ukrainian].
12. Aulin, V., Derkach, O., Makarenko, D., Hrynkiv, A., Pankov, A., & Tykhyi, A. (2019). Analysis of tribological efficiency of movable junctions "polymeric composite materials – steel". *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(12 (100), 6–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176845>

Oleksii Derkach, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Dmytro Makarenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yevhen Muranov**

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

The Effect of Graphite on the Physical and Mechanical Characteristics and tribological Properties of Secondary Polyethylene

The purpose of the work is to study the influence of graphite on the physical and mechanical characteristics and tribological properties of secondary polyethylene. For this, a study of the physical and mechanical characteristics and tribological properties of the original secondary polyethylene on PCM based on it was carried out.

The influence of the concentration of graphite in secondary polyethylene on the value of strength stress and relative elongation under tension at the maximum load and destruction of the samples was determined. It was established that the optimal concentration of graphite should not exceed 2 wt. %. An increase in the volume of the filler in the matrix leads to a significant decrease in the physical and mechanical characteristics of the obtained materials. It was established that the introduction of graphite into the structure of secondary polyethylene, regardless of its volume, leads to an increase in the microhardness of the obtained PCM. It was found that the temperature in the vicinity of friction, under the condition of friction without lubrication on steel 45 and the selected modes, did not exceed 69 °C. An increase in linear speed above 0.5 m/s or pressure above 1 MPa leads to an increase in the temperature in the friction zone to 72...73 °C, which is critical for polyethylene and leads to catastrophic wear of the samples. It was established that under the selected modes of friction, linear speed of sliding and pressure do not have a significant effect on the amount of wear and tear.

The resulting polymer composite provides performance under the condition that the pressure does not exceed 1 MPa, and the linear speed is up to 0.5 m/s. For use in mechanisms and machines that work in friction conditions according to the criterion $PV \leq 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$, it is possible to recommend the introduction of 2% by mass. graphite into the structure of secondary polyethylene. The introduction of graphite in the amount of up to 2% by mass. will allow to stabilize and moderately increase the strength characteristics of the obtained material, in comparison with unfilled polyethylene.

secondary polyethylene, graphite, physical and mechanical characteristics, tribological properties, wear

Одержано (Received) 16.09.2022

Прорецензовано (Reviewed) 25.09.2022

Прийнято до друку (Approved) 26.09.2022