

**Едуард Лисенков**

доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем  
Чорноморський національний університет імені Петра Могили (Миколаїв)

E-mail: [ea lysenkov@ukr.net](mailto:ea lysenkov@ukr.net). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1369-4609>

ResearcherID: [R-2601-2019](https://orcid.org/0000-0002-1369-4609). SCOPUS Author ID: [39761976100](https://orcid.org/0000-0002-1369-4609)

## ВПЛИВ МОДИФІКАЦІЇ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБОК НА МІКРОСТРУКТУРУ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ НАНОКОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ПОЛІЕТИЛЕНУ

У науковій статті наведено результати досліджень мікроструктури та функціональних характеристик полімерних наноконкомпозитних матеріалів на основі поліетилену шляхом введення до їхнього складу модифікованих вуглецевих нанотрубок. З метою поліпшення властивостей матеріалів проводили модифікацію нанотрубок за допомогою поліетиленгліколю. Методами оптичної мікроскопії, імпульсної спектроскопії та механічних випробувань було досліджено мікроструктуру, електричні та механічні характеристики полімерних наноконкомпозитних матеріалів. Показано, що нековалентна функціоналізація ВНТ за допомогою обробки поліетиленгліколем приводить до кращого розподілу нанотрубок у полімерній матриці та поліпшення електричних і механічних властивостей наноконкомпозитних матеріалів на основі поліетилену.

**Ключові слова:** вуглецеві нанотрубки; полімерний наноконкомпозит; електропровідність; механічна міцність.

Рис.: 5. Бібл.: 11.

**Актуальність теми дослідження.** Полімерні наноконкомпозити – це багатофазні матеріали, які складаються з полімеру або кополімеру, що містить наночастинки або нанонаповнювачі, дисперговані в полімерній матриці, які значно впливають на кінцеві фізичні властивості. У більшості досліджень для створення полімерних наноконкомпозитів використовують різноманітні нанонаповнювачі різної природи: вуглецеві (графен, вуглецеві нанотрубки, сажа, фулерени), наноксиди металів та шаруваті наносилікати (монтморилоніт, лапоніт, бентоніт) для досягнення покращених механічних, теплофізичних, електричних та газових бар'єрних властивостей [1]. Завдяки своїм унікальним фізичним властивостям вуглецеві нанонаповнювачі, зокрема вуглецеві нанотрубки (ВНТ), стали одним із найбільш перспективних наповнювачів для створення нового класу полімерних наноматеріалів [2].

Найважливішим етапом у створенні полімерних наноконкомпозитів є сумісність і дисперсія нанонаповнювачів у полімерній матриці. Добре диспергований стан забезпечує максимальне зміцнення, яке впливає на сусідні полімерні ланцюги і, відповідно, на властивості всієї матриці. Тому значні зусилля вчені зосереджують на отриманні однорідної та добре диспергової системи.

**Постановка проблеми.** Різні види модифікації ВНТ, зокрема ковалентна і нековалентна функціоналізація, є одними із загальноприйнятих методів вирішення проблеми їх розподілу в полімерах і розчинниках [3]. Функціоналізовані ВНТ, що володіють спорідненістю до неполярних матриць, придатні для використання в композитах на основі поліолефінів. Зокрема, до ефективних модифікаторів поліетилену належать алкільовані, фторовані та силанізовані ВНТ [4]. До ефективних типів модифікації також належить використання гібридного наповнювача, тобто суміші двох нанонаповнювачів, які, завдяки синергетичному ефекту, приводять до покращення властивостей полімерної матриці, порівняно з окремим їх використанням. Однак ці методи мають як свої переваги, так і недоліки, а підбір оптимального методу залежить від багатьох факторів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Автори роботи [5] виготовили серію композитів на основі поліпропілену, що містять 0,5 % ВНТ, методом змішування у розплаві та оцінили фактичний рівень дисперсії наповнювача в полімерній матриці. Результати підтверджують, що хімічні особливості поверхні розділу відіграють ключову роль для кінцевого розподілу наповнювача. Погано дисперговані нанотрубки в полімерній матриці демонструють у середньому як найбільшу кількість, так і найбільший розмір агломератів, що приводить до погіршення функціональних властивостей матеріалу загалом.

У роботі [6] запропоновано використовувати більш екологічний та економічний спосіб функціоналізації ВНТ стеаратом титану. Функціоналізація ВНТ стеаратом титану сприяє збільшенню їх спорідненості до полімерної матриці на основі ПЕ та ефективному використанню в композитах з підвищеною твердістю, зносостійкістю та вологістю. Подібні результати з початковими (нефункціоналізованими) ВНТ можуть бути досягнуті при концентраціях, які на порядок перевищують концентрації функціоналізованих ВНТ.

Автори роботи [7] запропонували метод модифікації ВНТ за допомогою іншого нанонаповнювача – нанорозмірної сажі. Суміші ВНТ та сажі вводили у матрицю поліетилену низької густини методом компаундування з розплаву. Для всіх досліджуваних матеріалів спостерігалася хороша дисперсія та розподіл вуглецевих нанонаповнювачів, яка сприяла підвищенню модуля Юнга, що збільшувався зі зростанням кількості вуглецевих нанонаповнювачів.

Альтернативним підходом до покращення дисперсності ВНТ у полімерній матриці є нековалентна модифікація нанотрубок. Один із найбільш продуктивних методів покращення розподілу ВНТ був запропонований авторами роботи [8]. Модифікацію ВНТ проводили нехімічним способом за допомогою поліетиленгліколю (ПЕГ). У результаті такої модифікації утворюються фізичні зв'язки між поверхнею нанотрубки та полярною макромолекулою ПЕГ. При цьому автори стверджують, що дисперсія та стабільність ВНТ, нековалентно функціоналізованих за допомогою ПЕГ, були значно покращені

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Отже, однією із ключових проблем сучасного полімерного матеріалознавства є створення матеріалів із наперед заданими та покращеними функціональними характеристиками. Для цього створюються полімерні нанокомпозити, кінцеві характеристики яких значно залежать від розподілу наповнювача. Хімічна функціоналізація нанонаповнювачів, зокрема вуглецевих нанотрубок, є технологічно складною через велику кількість стадій та використання дорогих та/або токсичних реагентів. Альтернативний підхід до покращення дисперсності наповнювача у матриці також має свої недоліки. Так, наприклад, Paszkiewicz та ін. [7] показали, що модифікація ВНТ за допомогою наночастинок сажі приводила до зниження міцності на розрив отриманих нанокомпозитів зі збільшенням їх концентрації. Також не спостерігалася додаткового покращення механічних, електричних та теплофізичних властивостей нанокомпозитів при введенні гібридного наповнювача. Існують методи нековалентної модифікації наповнювача, проте залишається не вивченим, яким чином така модифікація впливатиме на кінцеві властивості матеріалу на основі термопластичних поліолефінів, наприклад поліетилену.

**Мета статті.** Метою цієї роботи є поліпшення функціональних характеристик полімерних нанокомпозитних матеріалів на основі поліетилену шляхом нековалентної модифікації введених до їх складу вуглецевих нанотрубок.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі завдання:

1. Отримати нанокомпозитні матеріали, наповнених немодифікованими та ПЕГ-модифікованими ВНТ.
2. Вивчити вплив нековалентної модифікації ВНТ за допомогою поліетиленгліколю на мікроструктуру отриманих нанокомпозитних матеріалів.
3. Дослідити електричні властивості матеріалів зі ВНТ різної модифікації.
4. Дослідити механічні характеристики отриманих матеріалів.

**Експериментальна частина.** Для дослідження використовували матеріали на основі поліетилену високої густини, наповнені модифікованими та немодифікованими багатощаровими вуглецевими нанотрубками.

**Матеріали.** Поліетилен високої густини (ПЕВГ), виробництва SABIC®HDPE Eurotrubplast Holding Company Ltd Trusthose (Саудівська Аравія), був обраний полімерною матрицею для приготування дослідних зразків ( $T_m \approx 415$  K).

Для дослідження використовували різні серії немодифікованих та нековалентно модифікованих вуглецевих нанотрубок. Для нековалентної модифікації ВНТ використовували поліетиленгліколь.

Поліетиленгліколь (ПЕГ-1000),  $HO[-CH_2-CH_2-O-]_nH$  ( $n \approx 22$ ) молекулярної маси  $M_w = 1000$ , виробництва компанії Aldrich. При  $T = 298$  К ПЕГ-1000 є твердою речовиною з густиною  $\rho = 1093$  кг/м<sup>3</sup>. Температура плавлення  $T_{пл} \approx 308-312$  К.

Багатошарові вуглецеві нанотрубки (ВАТ «Спецмаш» (Україна)) виготовлені методом CVD з використанням  $FeAlMo$  як каталізатора. На поверхні ВНТ наявні гідроксильні, карбоксильні та лактонні функціональні групи. Довжина нанотрубок становила  $(5 \div 10)$  мкм, діаметр 18-20 нм, а питома площа поверхні – 190 м<sup>2</sup>/г [9].

Нековалентну модифікацію ВНТ проводили за схемою, наведеною на рис. 1. ПЕГ-1000 розчиняли у воді у співвідношенні 1:5. Після розчинення додавали ВНТ, при цьому співвідношення ПЕГ-ВНТ становило 1:3. Після цього суміш змішували за ультразвукового диспергатора УДЗН А-650. Диспергація тривала неперервно протягом 10 хв на частоті 22 кГц, потужність ультразвуку становила 100 Вт. На завершальному етапі проводили випарювання води.

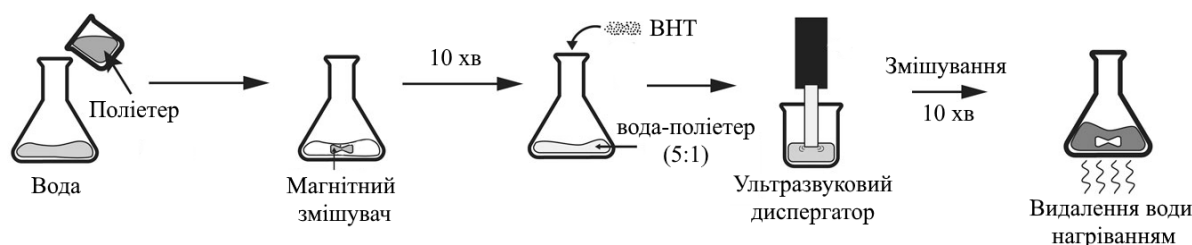


Рис. 1. Схема модифікації ВНТ

Для встановлення впливу модифікації на розподіл нанотрубок у полімерній матриці та кінцеві функціональні властивості готували дві серії полімерних нанокомпозитів на основі поліетилену. Зразки першої серії містили не модифіковані ВНТ, а другої – ВНТ, які були нековалентно модифіковані. Вміст ВНТ варіювали від 0,5 до 5 мас. %.

**Виготовлення матеріалів.** Композитні зразки були виготовлені методом екструзування (механічного перетирання у розплав) за допомогою поршневого екструдера з подальшим охолодженням за н. у. Основною перевагою поршневих екструдерів над шнековими є можливість варіювати час змішування частинок наповнювача з розплавленою полімерною матрицею, після чого можна сформувати досліджуваний зразок у вигляді або пластини, або нитки.

Технологія виготовлення досліджуваних матеріалів приведена нижче [10]. Після попередньої підготовки компонентів композиційного матеріалу з використанням методу механічного змішування суміш завантажувалася в екструдер (рис. 2). Форма нагрівалася до 200 °С. Обертання поршня забезпечує змішування розплаву полімерного композиту за рахунок власної відносно високої в'язкості полімеру.

Експериментально встановлено, що найбільш рівномірне змішування частинок наповнювача у матриці відбувається протягом 10 хв. При подальшому збільшенні часу змішування відбувається часткова деструкція полімеру. Через 10 хв у нижній частині прес-форми відкривався отвір та не вимикаючи обертання поршня поступово збільшується тиск поступального руху. Зсувні напруги, які виникали, змушували розплав полімерного композиту проходити крізь отвір (діаметр  $\sim 2$  мм). Після чого отриманий матеріал у ниткоподібній формі поміщали у перс-форму для гарячого пресування, де задавали відповідну форму досліджуваного зразка.

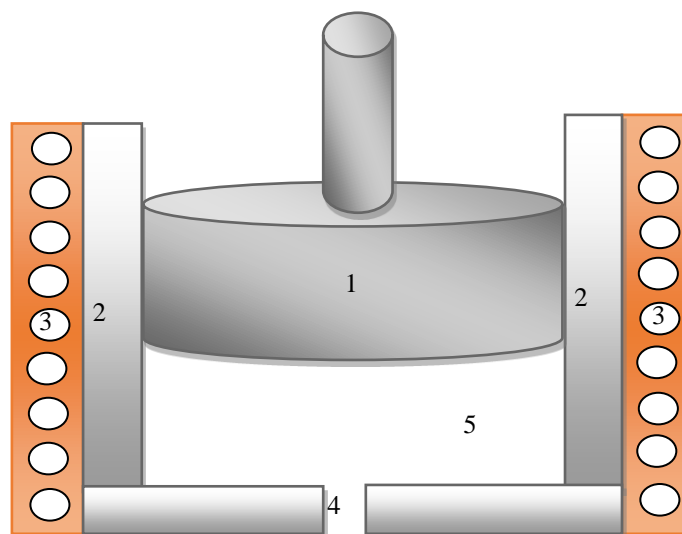


Рис. 2. Схематичне зображення поршневого екструдера:  
1 – поршень, який обертається; 2 – циліндрична основа; 3 – нагрівач;  
4 – отвір в основі циліндричної форми; 5 – порошкоподібний композит

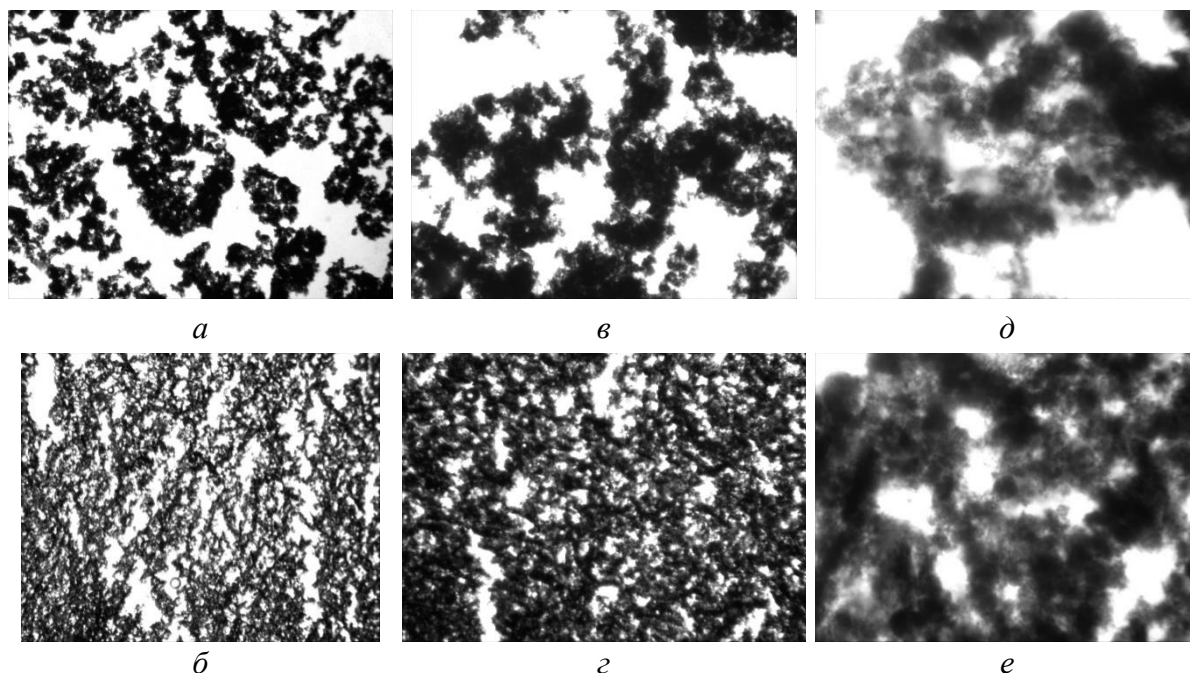
**Методи дослідження.** Дослідження мікроструктури отриманих матеріалів проводили за допомогою цифрового оптичного мікроскопа SIGETA MB-303 (Україна), який обладнано цифровою відеокамерою SIGETA DCM-800 (Україна). Для проведення досліджень матеріали у розплавленому стані поміщали між двома плоскопаралельними скляними пластинками, відстань між якими становила 80 мкм. Для отримання інформації про фрактальність структури кластерів із ВНТ, отримані мікрознімки обробляли використовуючи програму ImageJ v1.41.

Електропровідність отриманих матеріалів досліджували методом імпедансної спектроскопії, реалізованого на базі вимірювача імітансу Е7-20 (Білорусь). Використовували двоелектродний метод вимірювання електропровідності. Товщина зразків варіювалась від 1 до 2 мм. Діаметр електродів становив 15 мм.

У роботі проведено дослідження руйнівних напружень при розтягу (міцність на розрив). Розміри зразків, що досліджували: довжина  $l = 100 \pm 2$  мм, діаметр  $d = 2 \pm 0,3$  мм. Дослідження впливу вмісту наповнювача на міцність на розрив проводили з використанням автоматизованої розривної машини УМ-5 (Україна) (модифікованої високоточними датчиками тиску та переміщення) за швидкості навантаження  $v = 5$  Н/с. Похибка вимірювання становила не більше 3 %.

**Результати досліджень.** На рис. 3 наведені мікроскопічні зображення немодифікованих ВНТ та ПЕГ-модифікованих ВНТ. Із фотографій видно, що немодифіковані ВНТ утворюють великі та щільні агрегати, тоді як нековалентно модифіковані ВНТ мають більш рівномірний розподіл. Можна побачити, що більш рівномірний розподіл модифікованих ВНТ є масштабно-інваріантним, тобто характер розподілу не залежить від масштабування при отриманні мікрофотографій.

З рис. 3 також видно, що у випадку немодифікованих ВНТ при вмісті 0,75 % утворюються щільні агрегати, які частково контактують між собою. Оскільки прямого контакту між кластерами не спостерігається, можна припустити, що при такому наповненні не відбудеться різкої зміни властивостей системи. У випадку модифікованих ВНТ спостерігається велика кількість контактів між кластерами нанотрубок, що, очевидно, приведе до зміни властивостей у цьому концентраційному діапазоні наповнювача.



*Рис. 3. Мікрофотографії систем, які містять не модифіковані ВНТ (а, в, д), та ПЕГ-модифіковані-ВНТ (б, з, е). Збільшення а, б –  $\times 40$ ; в, з –  $\times 100$ , д, е –  $\times 400$ . Вміст ВНТ різних типів у полімерні матриці становив 0,75 %*

**Електричні властивості.** Полімерні наноккомпозитні матеріали, які містять ВНТ, володіють електропровідними властивостями та завдяки гнучкості й нанорозмірам нанотрубок, характеризуються дуже низькою критичною концентрацією (порогом перколяції) [11].

На рис. 4 наведена залежність питомої електропровідності при постійному струмі від вмісту наповнювача для досліджуваних матеріалів на основі поліетилену. Стрибок-подібна зміна питомої електропровідності у концентраційному інтервалі ВНТ від 0,5 до 1 % пов'язана з явищем перколяції. При досягненні критичної концентрації спостерігається стрибок питомої електропровідності на 6-7 десяткових порядків. Такий ефект пояснюється утворенням у наноккомпозитній системі електропровідної сітки із ВНТ, які контактуючи між собою пронизують увесь об'єм матеріалу.

З рис. 4 також видно, що модифікація ВНТ значно впливає як на характер залежності, так і на абсолютні значення питомої електропровідності досліджуваних матеріалів. При використанні немодифікованих ВНТ поріг перколяції становить 0,8 %. Використання ж ПЕГ-модифікованих ВНТ приводить до зниження порогу перколяції, який для даної системи становить 0,5 %. Такий ефект пов'язаний із більш рівномірним розподілом ВНТ у полімерній матриці. При цьому ймовірність утворення контактів між ВНТ стає вищою, тому критична концентрація наповнювача, при якій спостерігається різкий стрибок електропровідності значно знижується. Проте, аналізуючи загальні рівні питомої електропровідності для обох систем, можна побачити обернену залежність: після досягнення порогу перколяції для немодифікованих ВНТ спостерігається на порядок вищий рівень питомої електропровідності у порівнянні з ПЕГ-модифікованими ВНТ. Такий ефект можна пояснити тим, що у випадку немодифікованих ВНТ утворюються щільні агрегати, де ймовірність прямих контактів між ВНТ вища. У випадку модифікованих ВНТ, макромолекули ПЕГ, які розміщені на поверхні нанотрубки, перешкоджають їх прямому дотику, а електропровідність реалізується за механізмом тунелювання.

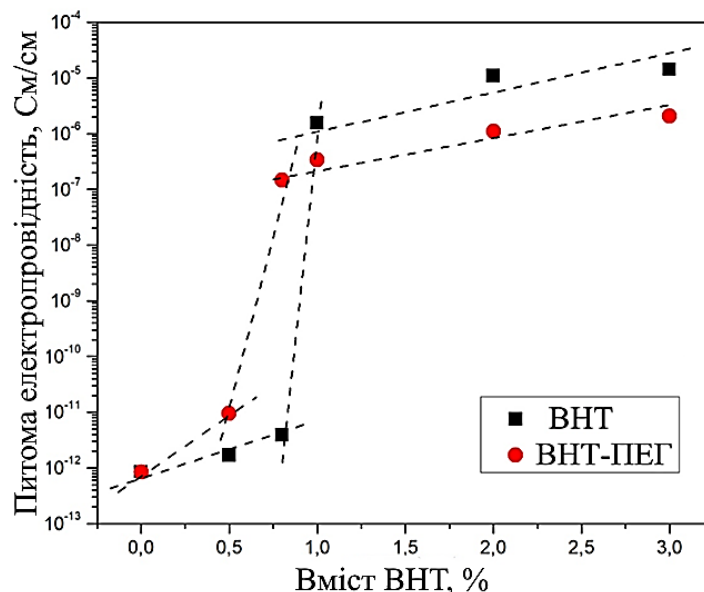


Рис. 4. Залежність питомої електропровідності при постійному струмі для системи на основі поліетилену від вмісту немодифікованих (ВНТ) та модифікованих (ВНТ-ПЕГ) нанотрубок при  $T = 293\text{ K}$

**Механічні властивості.** Крім впливу на мікроструктуру та електричні властивості, модифікація ВНТ приводить до значного поліпшення механічних характеристик отриманих матеріалів. Для вивчення впливу модифікації наповнювача на механічні характеристики системи ПЕВГ-ВНТ проводили дослідження межі міцності (на розрив) отриманих матеріалів. На рис. 5 приведена залежність межі міцності ( $\sigma_p$ ) від вмісту ВНТ різної модифікації. З отриманої залежності видно, що зі збільшенням вмісту наповнювача межа міцності системи зростає.

На рис. 5 показано, що зі зростанням вмісту немодифікованих ВНТ, межа міцності досліджуваних систем зростає з 30,5 МПа для ненаповненого ПЕВГ до 38,8 МПа для системи ПЕВГ-5 % ВНТ. Зростання механічних характеристик в отриманих матеріалах можна пояснити внеском від наповнювача, який має більшу міцність, ніж полімерна матриця.

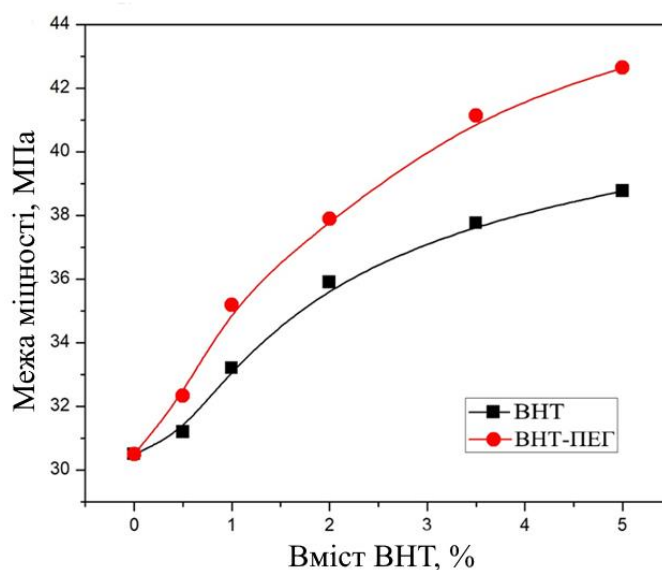


Рис. 5. Залежність межі міцності від вмісту ВНТ для матеріалів на основі поліетилену

З рис. 5 також видно, що зростання межі міцності спостерігається і для систем, які містять ПЕГ-модифіковані ВНТ. При цьому межа міцності зростає до 43 МПа при 5 % вмісті ВНТ. Так відмінність у значеннях міцності пояснюється кращим розподілом модифікованих ВНТ у полімерній матриці в порівнянні з немодифікованими нанотрубками. На відміну від електропровідності, де необхідний безпосередній контакт між нанотрубками, для покращення механічних властивостей ключову роль відіграє міжфазний шар між матрицею та наповнювачем. У випадку ПЕГ-модифікації відбувається збільшення частки такого міжфазного шару через зростання сумарної поверхні дотику між матрицею та нанотрубками.

**Висновки.** Розглянуті в роботі питання щодо покращення функціональних характеристик полімерних нанокompозитних матеріалів шляхом нековалентної модифікації вуглецевих нанотрубок є досить актуальними. Їх вирішення дозволяє в перспективі створювати конструкційні матеріали різного призначення.

Також виконані дослідження дозволяють стверджувати наступне. Нековалентна функціоналізація ВНТ за допомогою обробки поліетиленгліколем призводить до кращого розподілу нанотрубок у полімерній матриці. При цьому великі щільні агрегати, які характерні для немодифікованих ВНТ, стають більш розпушеними, що збільшує доступну поверхню нанотрубок для контакту із матрицею полімеру. Встановлено, що для систем, які містять нефункціоналізовані ВНТ характерний вищий поріг перколяції та вищий рівень електропровідності, тоді як при використанні ПЕГ-модифікованих ВНТ поріг перколяції і електропровідність є нижчими. Показано, що різний характер розподілу нанотрубок, який залежить від їх модифікації значно впливає на механічні властивості матеріалів, зокрема на межу міцності. Встановлено, що при використанні модифікованих ВНТ міцність на розрив зростає з 38,8 до 43 МПа у порівнянні із немодифікованими ВНТ.

#### Список використаних джерел

1. Ehsani M. Structure–Function Relationships of Nanocarbon/Polymer Composites for Chemiresistive Sensing: A Review / M. Ehsani, P. Rahimi, Y. Joseph // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – P. 3291.
2. A review of the interfacial characteristics of polymer nanocomposites containing carbon nanotubes / J. Chen, B. Liu, X. Gao, D. Xu // *RSC Adv*. – 2018. – Vol. 8. – Pp. 28048-28085.
3. Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review / P.-C. Ma, N. A. Siddiqui, G. Marom, J.-K. Kim // *Composites: Part A*. – 2010. – Vol. 41. – Pp. 1345–1367.
4. Dodecylamine functionalization of carbon nanotube to improve dispersion, thermal and mechanical properties of polyethylene based nanocomposites / F. V. Ferreira, W. Franceschi, B. R. Meneses et. al. // *Appl. Surf. Sci.* – 2017. – Vol. 410. – P. 266.
5. Dispersion of carbon nanotubes in melt compounded polypropylene based composites investigated by THz spectroscopy / R. Casini, G. Papari, A. Andreone, et. al. // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23, № 14. – P. 18181.
6. Polymer composites based on functionalized carbon nanotubes / T. P. Dyachkova, D. V. Tarov, E. A. Burakova et. al. // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* – 2019. – Vol. 693. – P. 012011.
7. Enhanced Functional Properties of Low-Density Polyethylene Nanocomposites Containing Hybrid Fillers of Multi-Walled Carbon Nanotubes and Nano Carbon Black / S. Paszkiewicz, A. Szymczyk, A. Zubkiewicz et. al. // *Polymers*. – 2020. – Vol. 12. – P. 1356.
8. Preparation of Ultrafiltration Membrane by Polyethylene Glycol Non-Covalent Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotubes: Application for HA Removal and Fouling Control / Y. Wang, M. Dong, X. Xiong et. al. // *Membranes*. – 2021. – Vol. 11. – P. 362.



9. Structure of Polyglycols Doped by Nanoparticles with Anisotropic Shape / E. Lysenkov, I. Melnyk, L. Bulavin, et. al. // *Physics of Liquid Matter: Modern Problems. Springer Proceedings in Physics* / L. Bulavin and N. Lebovka (eds.). – Switzerland : Springer International Publishing, 2015. – Pp. 165-198.

10. Lysenkov E. Determination of the effect of carbon nanotubes on the microstructure and functional properties of polycarbonate-based polymer nanocomposite materials / E. Lysenkov, L. Klymenko // *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. – 2021. – Vol. 4, №. 12. – P. 53-60.

11. Lysenkov E.A. Influence of modification of carbon nanotubes on microstructure and percolation behavior of the systems based on polyethylene glycol / E. A. Lysenkov, V. V. Klepko, I. P. Lysenkova // *Journal of Physical Studies*. – 2017. – Vol. 21 (4). – P. 4701.

### References

1. Ehsani, M., Rahimi, P., & Joseph, Y. (2021). Structure–Function Relationships of Nanocarbon. *Polymer Composites for Chemiresistive Sensing: A Review. Sensors*, 21, 3291.

2. Chen, J., Liu, B., Gao, X., & Xu, D. (2018). A review of the interfacial characteristics of polymer nanocomposites containing carbon nanotubes. *RSC Adv*, (8), 28048–28085.

3. Ma, P.-C., Siddiqui, N. A., Marom, G., & Kim J.-K. (2010). Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review. *Composites: Part A*, 41, 1345–1367.

4. Ferreira, F.V., Franceschi, W., Meneces, B.R. et. al. (2017). Dodecylamine functionalization of carbon nanotube to improve dispersion, thermal and mechanical properties of polyethylene based nanocomposites. *Appl. Surf. Sci.*, 410, 266.

5. Casini R., Papari G., Andreone A. et. al. (2015). Dispersion of carbon nanotubes in melt compounded polypropylene based composites investigated by THz spectroscopy. *Optics Express*, 14(23), 18181.

6. Dyachkova, T.P., Tarov, D.V., Burakova, E.A. et. al. (2019). Polymer composites based on functionalized carbon nanotubes. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 693, 012011.

7. Paszkiewicz, S., Szymczyk, A., Zubkiewicz, A. et. al. (2020). Enhanced Functional Properties of Low-Density Polyethylene Nanocomposites Containing Hybrid Fillers of Multi-Walled Carbon Nanotubes and Nano Carbon Black. *Polymers*, 12, 1356.

8. Wang, Y., Dong, M., Xiong, X. et. al. (2021). Preparation of Ultrafiltration Membrane by Polyethylene Glycol Non-Covalent Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotubes: Application for HA Removal and Fouling Control. *Membranes*, 11, 362.

9. Lysenkov, E., Melnyk, I., Bulavin, L. et. al. (2015). Structure of Polyglycols Doped by Nanoparticles with Anisotropic Shape. In L. Bulavin & N. Lebovka (eds.). *Physics of Liquid Matter: Modern Problems. Springer Proceedings in Physics*. Springer International Publishing, pp. 165–198.

10. Lysenkov, E., & Klymenko L. (2021). Determination of the effect of carbon nanotubes on the microstructure and functional properties of polycarbonate-based polymer nanocomposite materials. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 12(4), 53–60.

11. Lysenkov, E.A., Klepko, V.V., & Lysenkova, I.P. (2017). Influence of modification of carbon nanotubes on microstructure and percolation behavior of the systems based on polyethylene glycol. *Journal of Physical Studies*, 4(21), 4701.

Отримано 25.01.2022



**Eduard Lysenkov**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Intellectual Information Systems  
Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv)

E-mail: [calysenkov@ukr.net](mailto:calysenkov@ukr.net). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1369-4609>

ResearcherID: [R-2601-2019](https://orcid.org/0000-0002-1369-4609). SCOPUS Author ID: [39761976100](https://orcid.org/0000-0002-1369-4609)

**THE EFFECT OF CARBON NANOTUBES MODIFICATION  
ON MICROSTRUCTURE AND FUNCTIONAL PROPERTIES  
OF POLYMER NANOCOMPOSITES BASED ON POLYETHYLENE**

*To expand the operational characteristics of polymer materials, nanofillers are introduced into their composition, one of the most promising is carbon nanotubes. However, the creation of such nanocomposite materials is associated with a number of difficulties, in particular with the need to evenly distribute the filler in the polymer matrix.*

*One of the promising directions for solving the distribution problem is the functionalization of carbon nanotubes using various methods. Each method has its advantages and disadvantages. Most of them lead to the growth of only certain properties of materials, but their application is an expensive and time-consuming process.*

*The analysis of research and publications in the field of improving the functional characteristics of polymer nanocomposite materials showed that the issue of non-covalent modification of carbon nanotubes and their use as a filler for the creation of structural materials is currently receiving little attention in the scientific literature.*

*The purpose of this work is to improve the functional characteristics of polymer nanocomposite materials based on high-density polyethylene by means of non-covalent modification of carbon nanotubes introduced into their composition.*

*The scientific article presents the results of studies of the microstructure and functional characteristics of polymer nanocomposite materials based on polyethylene by introducing modified carbon nanotubes into their composition. In order to improve the properties of the materials, nanotubes were modified using polyethylene glycol. Using the methods of optical microscopy, impedance spectroscopy and mechanical tests the microstructure, electrical and mechanical characteristics of polymer nanocomposite materials were investigated. It is shown that the non-covalent functionalization of CNTs by means of treatment with polyethylene glycol leads to a better distribution of nanotubes in the polymer matrix and an improvement of the electrical and mechanical properties of polyethylene-based nanocomposite materials.*

**Keywords:** carbon nanotubes; polymer nanocomposite; conductivity; mechanical strength.

*Fig.: 5. References: 11.*