

Т.М. Шевчук<sup>1</sup>, М.А. Бордюк<sup>2</sup>, В.А. Мащенко<sup>3</sup>, В.П. Квасніков<sup>4</sup>, В.В. Кривцов<sup>1</sup>

## Перколяційні характеристики наповнених поліуретанових ауксетиків

<sup>1</sup>Рівненський державний гуманітарний університет, Україна, [labor.relax@gmail.com](mailto:labor.relax@gmail.com)

<sup>2</sup>Рівненська медична академія, Україна, [bordiuk57@ukr.net](mailto:bordiuk57@ukr.net)

<sup>3</sup>Національний університет водного господарства та природокористування, Науково-виробнича фірма „ПРОДЕКОЛОГІЯ”, Рівне, Україна, [v.a.mashchenko@muwn.edu.ua](mailto:v.a.mashchenko@muwn.edu.ua)

<sup>4</sup>Національний авіаційний університет, Київ, Україна, [kvp@nau.edu.ua](mailto:kvp@nau.edu.ua)

За експериментальними значеннями швидкостей поширення поздовжніх і поперечних ультразвукових хвиль визначено коефіцієнт Пуассона поліуретанових систем наповнених частинками металу. Для таких систем коефіцієнт Пуассона є від'ємним. Його значення для металонаповнених полімерних ауксетиків з поліуретановою матрицею дозволило визначити фрактальні розмірності та критичні індекси перколяції. Такий підхід дав можливість з'ясувати особливості структуроутворення в полімерних ауксетиках. Показано, що фрактальні-перколяційні характеристики таких систем.

**Ключові слова:** полімерний ауксетик, коефіцієнт Пуассона, фрактал, критичні індекси перколяції, перколяційний кластер, координаційне число, макрогратка.

Подано до редакції 02.01.2022; прийнято до друку 20.09.2022.

### Вступ

Зростання використання полімерних матеріалів в різних областях життєдіяльності людства обумовлює розширення їх виробництва [1]. Розвиток сучасної науки про полімери дає можливість створювати різноманітні полімерні системи. При цьому розвиток та досягнення сучасної науки про полімери відкривають можливості до створення полімерних композиційних матеріалів багатофункціонального призначення з використанням одного з найбільш дієвих методів модифікації їх структури та властивостей – наповнення [2, 3].

Серед таких матеріалів особливе місце належить полімерним ауксетикам [4–6], які знаходять перспективи застосування в різних галузях науки, техніки, виробництва [7, 8]. Для аналізу структурних особливостей полімерних систем з від'ємним коефіцієнтом Пуассона та їх ауксетичної поведінки використовуються різноманітні моделі [9, 10]. Особливості структуроутворення в полімерних

ауксетиках вказують на термодинамічну нерівноважність цих процесів та їх нелінійність. Це дає можливість використовувати, як і для інших полімерів, фрактальні та перколяційні підходи [11–14].

Метою цієї роботи є визначення перколяційних та структурних параметрів ауксетичних поліуретанових композицій і їх трактування на основі моделі полімеру з критичним вмістом наповнювача.

### I. Матеріали та методи досліджень

Для дослідження використовувався термопластичний поліуретан (ТПУ) синтезований на основі 4,4-дифенілметандізоціаната, 1,4-бутандіола і поліокситетраметиленгликоля з  $M_n = 1500$ , наповнений високодисперсними порошками заліза (Fe), молібдену (Mo), вольфраму (W), міді (Cu). Розміри частинок склали 0,3–1,0 мкм. Композиції отримували прямим змішуванням у Т-р режимі. Об'ємна концентрація наповнювача для ТПУ-систем

відповідала критичній в системі і відповідно для Мо, Fe, W, Cu рівна 48; 43, 52, 50 об. % [15, 16].

Визначення швидкості поширення поздовжньої  $v_l$  і поперечної хвилі  $v_t$  ультразвукових хвиль здійснювали при частоті  $\omega = 1,884$  МГц за методом, що базується на порівнянні результатів прямих вимірювань часу поширення зондувального імпульсу через імерсійну рідину при відсутності зразка ( $\tau$ ) та при наявності зразка ( $\tau_l$ ) між випромінювачем і приймачем сигналу [17, 18]. Значення  $v_l$  визначають за співвідношенням:

$$v_l = \frac{v_p d}{d - \Delta\tau v_p} \quad (1)$$

де  $v_p$  – швидкість поширення УЗ-хвилі в імерсійній рідині;  $d$  – товщина зразка матеріалу із строго паралельним поверхнями,  $\Delta\tau$  – різниця між часом зондувальних імпульсів ( $\Delta\tau_l = \tau - \tau_l$ ).

Величину  $v_t$  розраховують за таким співвідношенням:

$$v_t = \frac{v_p}{\sqrt{\sin^2(\theta_{кр}) + \left(\cos(\theta_{кр}) - \frac{v_p \Delta\tau_l}{d}\right)^2}} \quad (2)$$

де  $\Delta\tau_l$  – різниця між часом проходження зондувального імпульсу при відсутності зразка та при наявності зразка ( $\tau_l$ ), розміщеного кутом  $\theta_{кр}$  до напрямку падіння.

При відомих значеннях  $v_l$ ,  $v_t$  коефіцієнт Пуассона полімерного ауксетика обчислюється за таким співвідношенням:

$$\nu = \frac{2 - \left(\frac{v_l}{v_t}\right)^2}{2 \left(1 - \left(\frac{v_l}{v_t}\right)^2\right)} \quad (3)$$

Результати визначення швидкостей поширення УЗ-хвиль, коефіцієнта Пуассона ТПУ-системах подані в табл. 1.

## Результати та їх обговорення

В роботі [15] ТПУ-системи розглядалися на основі кластерної моделі [19], для яких на основі фрактального підходу визначені структурно-розмірні характеристики кластерів (впорядкованих областей) та міжкластерних (області не впорядкування).

У залежності від вмісту наповнювача в полімерній

структурні організації двох типів. Якщо вміст наповнювача менший за критичний, за відсутності сегрегації частинок, вони утворюють квазіоднорідну неперіодичну ґратку (з неоднаковими відстанями між частинками), в якій не відбувається кооперативного руху вузлів. При цьому інтенсивність їхнього індивідуального руху буде визначатися температурою термостату, розмірами частинок, в'язкістю полімерної матриці. Під дією зовнішніх сил частинки наповнювача будуть рухатися незалежно від руху сусідніх, як колоїдні частинки в середовищі з великою в'язкістю. Критичний вміст наповнювача в полімерній матриці призводить до структурних змін у системі, а саме до переходу полімерної матриці в міжфазний стан, властивості його відрізняться від властивостей ненаповненого полімеру. Наповнений полімер за таких умов розглядається як двокомпонентний: міжфазний шар – наповнювач. У цьому випадку система частинок наповнювача впорядковується, і рух її вузлів, занурених у міжфазний шар, є залежним від стану сусідів. Таку структурно-впорядковану систему розглядають як періодичну макроґратку [20].

Використання такого моделювання структурної організації ТПУ-систем дозволяє проаналізувати її на основі перколяційного підходу [21]. В такій системі структуроутворення характеризуються критичними перколяційними індексами. Області ближнього порядку в полімерній матриці та міжфазному шарі утворюють каркас перколяційного кластеру, і така підмножина описується критичним індексом перколяції  $\beta$ . Іншу підмножину в структурній організації полімеру складають невпорядковані області, що характеризуються критичним індексом перколяції  $\nu_0$ . При критичному вмісті наповнювача його частинки утворюють нескінченні ланцюги, з'єднані макромолекулярними елементами, і каркас. Їхня поведінка описується критичними індексами  $\gamma$ ,  $t$ . Критичні індекси перколяції визначали за значеннями фрактальної розмірності структуроутворень наповнених полімерів:

$$\beta = \frac{1}{d_f}; \quad \nu_0 = \frac{2}{d_f}; \quad \gamma = \frac{3}{d_f}; \quad t = \frac{4}{d_f} \quad (4)$$

Для знаходження фрактальної розмірності структуроутворень таких систем використовували синергетичний підхід, за яким:

$$d_f = (d - 1)(1 + \nu), \quad (5)$$

Таблиця 1

Характеристики ТПУ-систем.

| Композиція      | $\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup> | $\rho_m$ , кг/м <sup>3</sup> | $\varphi_n$ , об. % | $v_l$ , м/с | $v_t$ , м/с | $r_n \cdot 10^{-7}$ , м     | $\nu$  |
|-----------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|-------------|-------------|-----------------------------|--------|
| ТПУ             | 1125                         |                              |                     | 1635        | 1415        | 3.0; 4.0; 5.0; 6.0; 9.0; 10 | - 0.99 |
| ТПУ+48 об. % W  | 1125                         | 19000                        | 0.48                | 1755        | 1405        | 3.0; 4.0; 5.0; 6.0; 9.0; 10 | - 0.39 |
| ТПУ+43 об. % Мо | 1125                         | 9010                         | 0.43                | 1700        | 1355        | 3.0; 4.0; 5.0; 6.0; 9.0; 10 | - 0.38 |
| ТПУ+52 об. % Fe | 1125                         | 7870                         | 0.52                | 1775        | 1370        | 3.0; 4.0; 5.0; 6.0; 9.0; 10 | - 0.24 |
| ТПУ+50 об. % Cu | 1125                         | 8900                         | 0.50                | 1750        | 1500        | 3.0; 4.0; 5.0; 6.0; 9.0; 10 | - 0.89 |

матриці можуть виникати просторово-площинні

Таблиця 2

Критичні індекси перколяції для ТПУ-систем.

| Композиція      | $\beta$ | $\nu_0$ | $\gamma$ | $t$   |
|-----------------|---------|---------|----------|-------|
| ТПУ+48 об. % W  | 0.89    | 1.63    | 2.45     | 3.27  |
| ТПУ+43 об. % Мо | 0.8     | 1.61    | 2.41     | 3.22  |
| ТПУ+52 об. % Fe | 0.66    | 1.31    | 1.97     | 2.63  |
| ТПУ+50 об. % Cu | 4.55    | 9.09    | 13.6     | 18.18 |
| ТПУ             | 50      | 100     | 150      | 200   |

де  $d = 3$  – розмірність евклідового простору.

Значення критичних індексів перколяції (табл. 2) вказують на суттєву відмінність в структурній організації у наповненому полімері та ТПУ-системах. Така різниця в значеннях критичних індексів перколяції вказує і на різну поведінку структуроутворень ТПУ-систем при перенесенні різних видів енергетичних збуджень (механічних, теплових, електричних). Ці значення для поліуретанових ауксетиків, при критичному вмісті наповнювача, значно перевищують відповідні значення для традиційних наповнених систем (наприклад для систем на основі полівінілхлориду та полівінілбутиралу з критичним вмістом наповнювача) [21].

Для наповнених полімерних ауксетиків структура перколяційного кластера умовно може бути прийнята двовимірною ( $d = 2$ ) або з врахуванням об'ємних ефектів – тривимірною з  $d = 3$ . Значення критичних індексів перколяції дозволяє в такій моделі визначити максимальні розміри скінченного кластера:

$$\Delta = d\nu_0 - \beta = \frac{2d-1}{d_f}. \quad (6)$$

У випадку виявлення площинних ефектів  $\Delta = \frac{3}{d_f}$ , а об'ємних –  $\Delta = \frac{5}{d_f}$ .

Властивості перколяційного кластера в самоподібному режимі характеризує параметр  $S$ , що описує швидкість росту опору фрактала із збільшенням його просторового масштабу. Величина аномальної дифузії  $\Theta$  при аналізі сорбційних властивостей наповнених полімерних систем непрямим чином дозволяє враховувати вплив масштабу на коефіцієнт дифузії. Для обчислення цих характеристик використовували співвідношення:

$$\Theta = \frac{t-\beta}{\gamma}; \quad S = \frac{t}{\nu_0} + d - 2 \quad (\text{for } d = 2 \text{ and } d = 3) \quad (7)$$

Розраховані значення відповідних характеристик

Розмірність перколяційних кластерів, фрактальна розмірність блукань, внутрішня розмірність блукань та спектральна розмірність системи для ТПУ-систем.

| Композиція      | $d_b; d = 2; \beta_b = 1.67$ | $d_b; d = 3; \beta_b = 1.68$ | $d_w$ | $d_w'$ | $d_s$ |
|-----------------|------------------------------|------------------------------|-------|--------|-------|
| ТПУ             | 2.98                         | 1.98                         | 0.007 | 3      | 0.13  |
| ТПУ+48 об. % W  | 0.97                         | 1.97                         | 0.41  | 2,97   | 0.82  |
| ТПУ+43 об. % Мо | 0.96                         | 1.96                         | 0.42  | 3      | 0.83  |
| ТПУ+52 об. % Fe | 0.72                         | 1.72                         | 0.5   | 3      | 1     |
| ТПУ+50 об. % Cu | 0.82                         | 2.82                         | 0.07  | 3      | 0.15  |

перколяційного кластера для ТПУ-систем подані в табл. 3.

В такій моделі скелет нескінченного перколяційного кластера фрактальної структури в наповнених поліуретанових композитах характеризується фрактальною розмірністю  $d_b$ . Із урахуванням критичного індексу  $\beta_b$ , що описує потужність скелета кластера (для  $d = 2$  індекс  $\beta_b = 1.67$  і для  $d = 3$  –  $\beta_b = 1.68$ ), а також фрактальною розмірністю блукань  $d_w$ , внутрішньою розмірністю блукань  $d_w'$  та спектральною розмірністю  $d_s$  [22]:

$$d_b = d - \frac{\beta_b}{\nu_0}; \quad d_w = \frac{d_f}{2+\Theta}; \quad d_w' = 2 + \Theta; \quad d_s = \frac{d_f}{2+\Theta}. \quad (8)$$

Таблиця 3

Показник, який визначає максимальні розміри кластера, показник властивостей перколяційного кластера в самоподібному режимі та характеристики аномальної дифузії для ТПУ-систем.

| Композиція      | $\Delta$ |         | $S$     |         | $\Theta$ |
|-----------------|----------|---------|---------|---------|----------|
|                 | $d = 2$  | $d = 3$ | $d = 2$ | $d = 3$ |          |
| ТПУ             | 150      | 250     | 2       | 3       | 1        |
| ТПУ+48 об. % W  | 2.37     | 4       | 2       | 3       | 1        |
| ТПУ+43 об. % Мо | 2.42     | 4.03    | 2       | 3       | 1        |
| ТПУ+52 об. % Fe | 1.96     | 3.27    | 2       | 3       | 1        |
| ТПУ+50 об. % Cu | 4.58     | 13.67   | 2       | 3       | 1        |

При формуванні перколяційного кластера виникає опір ( $\varepsilon$ ), який характеризується показником зв'язку опору кластера з його питомим опором ( $d_t$ ), розмірністю моментів часу  $t$ , в яких блукання повертається у вихідну точку та розмірність зовнішньої границі кластера ( $d_h$ ):

$$\varepsilon = d_w' - d_f; \quad d_t = 1 - \frac{d_s}{2}; \quad d_h = 1 + \frac{1}{\nu_0}. \quad (9)$$

Зазначені вище параметри, які характеризують

Таблиця 4

Розмірність перколяційних кластерів, фрактальна розмірність блукань, внутрішня розмірність блукань та спектральна розмірність системи для ТПУ-систем.

| Композиція      | $d_b; d = 2; \beta_b = 1.67$ | $d_b; d = 3; \beta_b = 1.68$ | $d_w$ | $d_w'$ | $d_s$ |
|-----------------|------------------------------|------------------------------|-------|--------|-------|
| ТПУ             | 2.98                         | 1.98                         | 0.007 | 3      | 0.13  |
| ТПУ+48 об. % W  | 0.97                         | 1.97                         | 0.41  | 2,97   | 0.82  |
| ТПУ+43 об. % Мо | 0.96                         | 1.96                         | 0.42  | 3      | 0.83  |
| ТПУ+52 об. % Fe | 0.72                         | 1.72                         | 0.5   | 3      | 1     |
| ТПУ+50 об. % Cu | 0.82                         | 2.82                         | 0.07  | 3      | 0.15  |

Таблиця 5

Розмірність перколяційних кластерів, фрактальна розмірність блукань, внутрішня розмірність блукань та спектральна розмірність системи для ТПУ-систем.

| Композиція      | $\varepsilon$ | $d_t$ | $d_h$ | $z$     |         |
|-----------------|---------------|-------|-------|---------|---------|
|                 |               |       |       | $d = 2$ | $d = 3$ |
| ТПУ             | 2.98          | 0.94  | 1.01  | 1592    | 3572    |
| ТПУ+48 об. % W  | 1.75          | 0.59  | 1.61  | 18.2    | 35      |
| ТПУ+43 об. % Mo | 1.76          | 0.58  | 1.62  | 17.76   | 34      |
| ТПУ+52 об. % Fe | 1.48          | 0.5   | 1.76  | 14.12   | 23.5    |
| ТПУ+50 об. % Cu | 2.78          | -0.98 | 1.11  | 137.6   | 303.6   |

процеси структуроутворення перколяційного кластера подані в табл. 4, 5.

В рамках перколяційного підходу для полімерних ауксетиків використовувалась залежність коефіцієнта Пуассона від структуроутворень матриці і наповнювача. Згідно роботи [23] між  $\nu$  та координаційним числом ( $z$ ) перколяційної решітки існує залежність:

$$\nu = \frac{d - \frac{z}{4}}{d(d-1) + \frac{z}{4}} \quad (10)$$

За значеннями  $\nu$  для ТПУ-систем визначимо координаційне число для двох випадків:

$$z = 8 - 16 \frac{\nu}{\nu+1} \quad (\text{для } d = 2);$$

$$z = 12 - 36 \frac{\nu}{\nu+1} \quad (\text{для } d = 3); \quad (11)$$

Як слідує із поданих у табл. 5 даних  $z$  суттєво відрізняється для ТПУ-систем від наповнених полімерів, для яких  $0 < \nu < 0,5$ . Це вказує на те, що при прикладанні зовнішніх навантажень деформація перколяційної решітки відбувається за іншими закономірностями ніж для традиційних наповнених полімерних систем.

У моделі макрогратки поверхню частинки наповнювача розглядали як фрактал розмірності  $d_h$ . Фрактальний взаємозв'язок між питомою поверхнею  $S_h$  і діаметром частинки наповнювача  $D_h$  виражається співвідношенням [24]:

$$S_h = 410 \left(\frac{D_h}{2}\right)^{d_h-d} \quad (12)$$

Звідки, отримаємо:

$$d_h = d + \frac{\ln S_h - \ln 410}{\ln r_h} \quad (13)$$

де  $r_h$  – радіус частинки наповнювача. Оскільки поверхня металевго наповнювача є джерелом потенціального поля, що визначається кількістю контактів: структурний елемент макромолекули-силовий центр наповнювача будемо мати, що кількість місць контакту залежить від розмірності доступною для такого контакту поверхні частинки  $d_u$ , яка визначається наступним чином:

$$d_u = d_h + -1 + \frac{d-d_h}{d_{wh}} \quad (14)$$

де  $d$  – розмірність евклідового простору, в якому розглядається фрактал (в нашому випадку  $d = 2; 3$ ),  $d_{wh}$  – розмірність випадкового блукання на фракталі, яку можна оцінити за співвідношенням Аароні-Штауффера:

$$d_{wh} = d_h + 1. \quad (15)$$

Ефективне значення цієї розмірності  $d_u^{eff}$  знижується із збільшенням її номінальної величини. Спостережена поведінка описується наступним рівнянням [24]:

$$d_u^{eff} = 2 - d_u. \quad (16)$$

Залежність цих характеристик від розмірів частинок металевго наповнювача для ТПУ-систем подані на рисунках 1–4 для двох та трьохмірної моделей  $d_h$ .

Як засвідчують результати розрахунків величин  $d_h$  та  $d_w$  (рис. 1, 3) збільшення розмірів частинок наповнювача зумовлює немонотонне зростання відповідних фрактальних характеристик для введених металевих інгредієнтів. Проте зростання розмірів частинок металевго наповнювача не призводить до суттєвих змін розмірностей доступних місць контакту структурних елементів макромолекул ТПУ з активними центрами поверхні (рис. 2, 4).

Для каркасу частинок наповнювача визначили фрактальну розмірність  $D_{fк.ч.}$  згідно співвідношення:

$$D_{fк.ч.} = d - d_f. \quad (17)$$

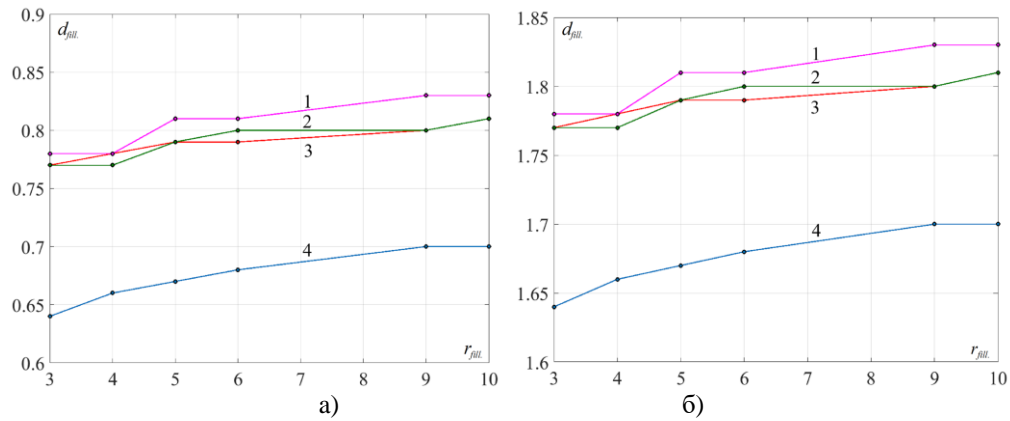
Результати розрахунків вказують на те, що при об'ємних дефектах ( $d = 3$ ), частинки наповнювачів при деформаціях характеризуються лінійною поведінкою.

Отже в моделі наповненого полімерного ауксетика при критичному вмісті наповнювача його структуроутворення утворюють плівкові структури.

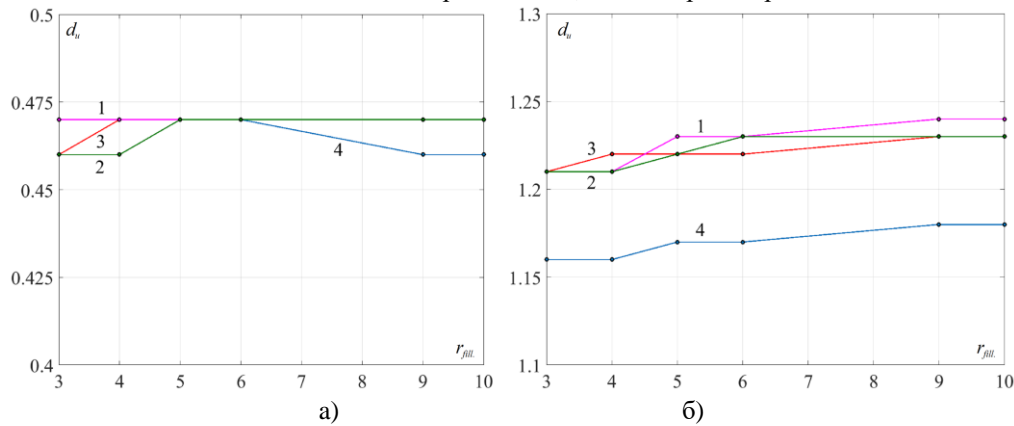
Таблиця 6

Фрактальна розмірність каркасу частинки наповнювача.

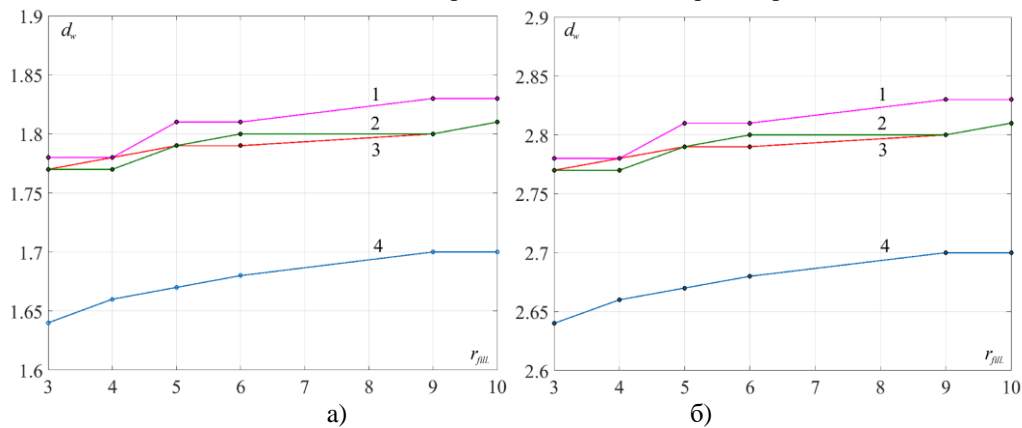
| Композиція      | $D_{fк.ч.}$ |         |
|-----------------|-------------|---------|
|                 | $d = 2$     | $d = 3$ |
| ТПУ+48 об. % W  | 0.78        | 1.78    |
| ТПУ+43 об. % Mo | 0.76        | 1.76    |
| ТПУ+52 об. % Fe | 0.48        | 1.48    |
| ТПУ+50 об. % Cu | 1.78        | 2.78    |



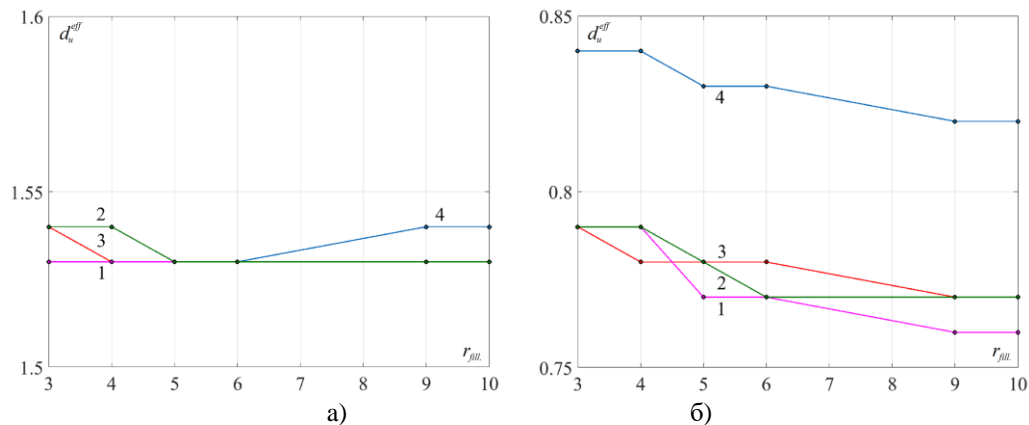
**Рис. 1.** Залежність  $d_H$  від розміру частинок наповнювача для 1 – ТПУ+Fe, 2 – ТПУ+Cu, 3 – ТПУ+Mo, 4 – ТПУ+W: а – для двовимірної моделі; б – для тривимірної моделі.



**Рис. 2.** Залежність  $d_u$  від розмірів частинок наповнювача для 1 – ТПУ+Fe, 2 – ТПУ+Cu, 3 – ТПУ+Mo, 4 – ТПУ+W: а – для двовимірної моделі; б – для тривимірної моделі.



**Рис. 3.** Залежність  $d_w$  від розмірів частинок наповнювача 1 – ТПУ+Fe, 2 – ТПУ+Cu, 3 – ТПУ+Mo, 4 – ТПУ+W: а – для двовимірної моделі; б – для тривимірної моделі.



**Рис. 4.** Залежність  $d_u^{eff}$  від розмірів частинок наповнювача 1 – ТПУ+Fe, 2 – ТПУ+Cu, 3 – ТПУ+Mo, 4 – ТПУ+W: а – для двовимірної моделі; б – для тривимірної моделі.

**Висновки**

Використання перколяційних підходів до ТПУ-систем показало, що структурні параметри їх відрізняються від відповідних характеристик традиційних наповнених систем, зокрема і на основі полімерів вінілового ряду [21]. Перколяційні параметри кластерів термополіуретанових ауксетиків визначаються типом металевого наповнювача та їх розмірами. Розгляд полімерної матриці, частинок наповнювача як фракталів дає можливість аналізувати процеси структурної організації в полімерних ауксетиках.

Визначені перколяційні параметри дозволяють аналізувати поведінку ТПУ- систем в силових

**Шевчук Т.М.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики;  
**Бордюк М.А.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фундаментальних дисциплін;  
**Мащенко В.А.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій;  
**Квасніков В.Р.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем і технологій;  
**Кривоць В.В.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики астрономії та методики викладання.

- [1] M. Harper, L. Guoqiang, A review of stimuli-responsive shape memory polymer composites. *Polymer* 54, 2199–2221 (2013); <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2013.02.023>.
- [2] G. M. Odegard, A. Bandyopadhyay, Physical aging of epoxy polymers and their composites. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics* 49 (24), 1695–1716 (2011); <https://doi.org/10.1002/polb.22384>.
- [3] F. Mengand, E. M. Terentjev, Theory of semi flexible filaments and networks. *Polymers* 9(52), 1–28, (2017); <https://doi.org/10.3390/polym9020052>.
- [4] K. S. Bhullar, Three decades of auxetic polymers: a review. *e-Polymers* 15(4), 205–215 (2015); <https://doi.org/10.1515/epoly-2014-0193>.
- [5] Y. T. Yao, K. L. Alderson, A. Alderson, Modeling of negative Poisson's ratio (auxetic) crystalline cellulose I $\beta$ . *Cellulose* 23, 3429–3448 (2016); <https://doi.org/10.1007/s10570-016-1069-9>.
- [6] E. P. Degabriele, D. Attard, J. N. Grima-Cornish, R. Caruana-Gauci, R. Gatt, K. E. Evans, J. N. Grima, On the Compressibility Properties of the Wine-Rack-Like Carbon Allotropes and Related Poly(phenylacetylene) Systems. *Phys. Status Solidi B* 256(1), 1800572, 1–10 (2019); <https://doi.org/10.1002/pssb.201800572>.
- [7] Y. K. Yi, R. Sharston, D. Barakat, Auxetic structures and advanced daylight control systems. *J. of Facade Design and Engineering* 7 (1), 063–074 (2019); <https://doi.org/10.7480/jfde.2019.1.2620>.
- [8] T. M. Shevchuk, M. A. Bordyuk, V. V. Krivtsov, V. A. Mashchenko, Fractal-percolation approach for determination of structural and mechanical properties of metal-filled polyurethane auxetics. *Metallophysics and Advanced Technologies* 42(9), 1293–1302 (2020); <https://doi.org/10.15407/mfint.42.09.1293>.
- [9] A. Cornillea, S. Dworakowskab, D. Bogdalb, B. Boutevina, S. Caillol, A new way of creating cellular polyurethane materials: NIPU foams. *European Polymer Journal* 66, 129–138 (2015); <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.01.034>.
- [10] T.-C. Lim, An anisotropic auxetic 2D metamaterial based on sliding microstructural mechanism. *Materials*, 12(3), 429; (2019); <https://doi.org/10.3390/ma12030429>.
- [11] V. Blavatska, C. von Ferber, Yu. Holovats, Star copolymers in porous environments: Scaling and its manifestations. *Phys. Rev. E* 83(1), 011803, 1–9 (2011); <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.83.011803>.
- [12] H.-K. Janssen, O. Stenull, Scaling exponents for a monkey on a tree: Fractal dimensions of randomly branched polymers. *Phys. Rev. E* 85(5), 051126, 1–15 (2012); <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.85.051126>.
- [13] K. Haydukivska, V. Blavatska, Conformational properties of polymers in anisotropic environments. *Condensed Matter Physics* 17(2), 23301, 1–15 (2014); <https://doi.org/10.5488/CMP.17.23301>.
- [14] V. Blavatska, N. Fricke, W. Janke. Polymers in disordered environments. *Condensed Matter Physics* 17(3), 33604, 1–11 (2014); <https://doi.org/10.5488/CMP.17.33604>.
- [15] T. M. Shevchuk, M. A. Bordyuk, Fractal Dimension and Parameters of the Grunaseina Polymer Systems with Negative Poissonratio. *Physics and Chemistry of Solid State* 17(4), 476–481 (2016); <https://doi.org/10.15330/pcss14.4.476-481>.
- [16] B. S. Kolupaev, Yu. S. Lipatov, V. I. Nikitchuk, N. A. Bordyuk, O. M. Voloshin, Composite materials with negative Poisson coefficient. *Inzh.-Fiz. Zhurnal*, 69(5), 726–733 (1996).
- [17] N. A. Bordyuk, S. M. Gusakovskii, S. M. Ivashchuk, B. S. Kolupaev, Acoustic properties of polymeric mixtures. *Acoustical Physics* 44(1), 15–17 (1998).
- [18] V. A. Mashchenko, O. O. Panchuk, I. O. Sadovenko, M. A. Bordyuk, Eksperymentalna ustanovka dlya vymiryuvannya pruzhnykh parametriv girskikh porid. *Bulletin of Engineering Academy of Ukraine* 3–4, 60–64 (2012).
- [19] G. V. Kozlov, V. U. Novikov, A cluster model for the polymer amorphous state. *Soviet Physics Uspekhi* 44(7), 681–724 (2001); <https://doi.org/10.1070/PU2001v044n07ABEH000832>.
- [20] B. S. Kolupaev, N. A. Bordyuk, Thermal conductivity study of the boundary layer in filled polyvinylchloride (PVC) and polyvinylbutyral (PVB). *Polymer Science U.S.S.R.* 23(7), 1652–1659 (1981); [https://doi.org/10.1016/0032-3950\(81\)90401-9](https://doi.org/10.1016/0032-3950(81)90401-9).

- [21] T. M. Shevchuk, M. A. Bordyuk, V. V. Krivtsov, V. A. Maschenko, Effect of critical filler content on structural and fractal percolation properties of filled vinyl polymers. *Polymer Journal* 41(4), 264–270 (2019); <https://doi.org/10.15407/polymer.41.04.264>.
- [22] M. I. Sokolov, Dimensionalities and other geometric critical exponents in percolation theory. *Soviet Physics Uspekhi* 29(10), 924–945 (1986); <https://doi.org/10.1070/PU1986v029n10ABEH003526>.
- [23] V. V. Novikov, K. W. Wojciechowski, Negative Poisson coefficient of fractal structures. *Physics of the Solid State* 41(12), 1970–1995 (1999).
- [24] G. V. Kozlov, Structure and properties of particulate-filled polymernanocomposites. *Soviet Physics Uspekhi* 58(1), 33–60 (2015); <https://doi.org/10.3367/UFNe.0185.201501c.0035>.

T.M. Shevchuk<sup>1</sup>, M.A. Bordyuk<sup>2</sup>, V.A. Mashchenko<sup>3</sup>, V.P. Kvasnikov<sup>4</sup>, V.V. Krivtsov<sup>1</sup>

## Percolation characteristics of filled polyurethane auxetics

<sup>1</sup>Rivne State University for the Humanities, [labor.relax@gmail.com](mailto:labor.relax@gmail.com)

<sup>2</sup>Rivne Medical Academy, [bordiuk57@ukr.net](mailto:bordiuk57@ukr.net)

<sup>3</sup>National University of Water and Environmental Engineering, Scientific and manufacturing company “PRODECOLOGIA”, Rivne, Ukraine, [v.a.mashchenko@muwn.edu.ua](mailto:v.a.mashchenko@muwn.edu.ua)

<sup>4</sup>National Aviation University, Kyiv, Ukraine, [kvp@nau.edu.ua](mailto:kvp@nau.edu.ua)

According to the experimental values of the propagation velocities of longitudinal and transverse ultrasonic waves, the Poisson's ratio of polyurethane systems filled with metal particles was determined. For such systems, the Poisson's ratio is negative. Its value for metal-filled polymer auxetics with polyurethane matrix allowed to determine fractal dimensions and critical percolation indices. This approach made it possible to clarify the features of structure formation in polymer auxetics. It is shown that the fractal-percolation characteristics of these systems are determined by the type of metal filler and the size of its particles.

**Keywords:** polymer auxetic, Poisson's ratio, fractal, critical percolation indices, percolation cluster, coordination number, macrolattice.