

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.5.6>

УДК 678:
620.168.3

КУРИПТЯ Я. А., СЕНИК І. В., БАРСУКОВ В. З., ХОМЕНКО В. Г.
Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ОДНО- ТА ДВОКОМПОНЕНТНОГО ВУГЛЕЦЕВОГО НАПОВНЮВАЧА НА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ АКРИЛОВОГО ПОЛІМЕРНОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО ПОКРИТТЯ

Мета. Дослідження впливу параметрів одно- та двокомпонентного вуглецевого наповнювача на електропровідність акрилового полімерного композиту у вигляді тонкого покриття.

Методика. Приготування зразків композитів відбувалось на швидкісному міксері занурюваного типу. Розміри та форму часточок наповнювачів, а також структуру полімерних композитів досліджували у відбитому світлі за допомогою мікроскопу МБИ-15У42. Електропровідність отриманих зразків вимірювали згідно стандартів ASTM D257-07 та ASTM F1711-96 відповідно до значень поверхневого опору зразків.

Результати. Визначено порогові перколяційні для композитів наповнених однокомпонентним наповнювачем – технічним вуглецем, графітом КГП-С1, вуглецевим волокном. В результаті проведених експериментів показано, що перколяційна поведінка провідності полімерних композитів, наповнених однокомпонентним наповнювачем, пов'язана з морфологією відповідного наповнювача та внутрішньою структурою, яку він утворює при взаємодії з полімером. Синтезовані полімерні композити з двокомпонентними наповнювачами КГП-С/технічний вуглець, вуглецеве волокно Т300/технічний вуглець, і різним співвідношенням вуглецевих матеріалів та загальним наповненням в композиті 50–70 об. % показали синергетичний ефект електропровідності при певному співвідношенні компонентів наповнювача.

Наукова новизна. Встановлено вплив співвідношення складових вуглецевого двокомпонентного наповнювача на електропровідність акрилового полімерного композиту.

Практична значимість. Визначено оптимальну пару вуглецевих наповнювачів, їх вміст та співвідношення двокомпонентного наповнювача в акриловому полімерному композиті. Отримані композити можуть бути використані для виготовлення електропровідного полімерного покриття.

Ключові слова: перколяційний поріг, вуглецевий наповнювач, двокомпонентний наповнювач, електропровідність, полімерний композит.

Вступ. Зазвичай, полімери це електричні ізолятори, що широко застосовуються в медицині, сільському господарстві, енергетичній галузі та електроніці, та багатьох інших сферах діяльності людини [1-4], питомий опір яких становить близько 10^{17} Ом·см. Щоб надати таким полімерам електропровідних властивостей їх поєднують з струмопровідними матеріалами, такими як: технічний вуглець [5], вуглецеві волокна [6], графіт [7], металеві порошки [8]; або з іншими полімерами, які володіють власною провідністю, як поліанілін [9, 10]. Дані матеріали називають електропровідними полімерними композитами. Такі композити були отримані у другій половині 20 століття [11] зі значеннями питомих опорів між металами (10^{-5} Ом·см) та ізоляційними матеріалами (10^{17} Ом·см) [12]. Електропровідні композити знаходять своє застосування у різних галузях людської діяльності, наприклад, електронному обладнанні [13], у вирішенні важливих стратегічних питань, таких як захист від електромагнітних перешкод [14]. Останнім часом електропровідні полімерні композити використовують, як складові для сенсорних компонентів [15]. Порівняно з металами електропровідні полімерні композити мають переваги, такі як легкість формування, низька щільність, широкий діапазон електропровідності, а також стійкість до корозії [16–19].

Постановка завдання. Переважна більшість електропровідних полімерних композитів характеризуються перколяційною поведінкою [20, 21] наповнених дисперсними та волокнистими струмопровідними матеріалами. З різних запропонованих моделей для опису електропровідності в наповнених полімерних системах найбільш повноцінною є модель

Кіркпатріка або скейлінгового закону [22, 23]. Відповідно до неї, в об'ємі полімерного композиту в результаті заповнення полімеру (ізолятора) провідним наповнювачем (наприклад, технічним вуглецем або графітом) утворюється розгалужена мережа частинок наповнювача. При досягненні критичної об'ємної частки наповнювача, що називається порогом перколяції, з'являється провідність всередині мережі наповнювача і полімерний композит стає провідним. На величину порогу перколяції впливають форма частинок наповнювача та взаємодія між наповнювачем і полімером [24]. Вивчення впливу параметрів наповнювача на електропровідність полімерного композиту дозволяє оптимізувати склад.

Мета роботи – вивчення впливу параметрів одно- та двокомпонентного наповнювача на електропровідність полімерного композиту.

Матеріали і методи дослідження. Для виготовлення ряду полімерних композитів використовували акриловий полімер – акрилова емульсія Dispersion K 498 (Kremer Pigmente GmbH & Co. KG, Німеччина) з сухим залишком 50 ± 1 %, середнім розміром часточок 0,15 мкм. Розчинником під час приготування полімерних композитів виступала дистильована вода. Як наповнювачі використовували вуглецеві матеріали різної морфології. Зокрема, технічний вуглець марки N330 (виробник Кременчуцький завод технічного вуглецю, Україна), питомою площею поверхні $78\text{--}88 \cdot 10^3$ м²/кг, препарат колоїдний графітовий С-1 (КГП С-1) (ТУ 113-08-48-63-90, виробник Заваллівський графітовий комбінат, Україна) з вмістом вуглецю не менше 99%, відсів з середнім розміром часток 45–70 мкм, подрібнене вуглецеве волокно марки Т300 (виробник – Toray Composite Materials America, Inc., США) з діаметром волокон 6–7 мкм, вмістом вуглецю не менше 93%, довжиною волокон 100–150 мкм. Для змочування, диспергування та стабілізації наповнювача у водному розчині полімерного композиту застосовували додаткові складові: дисперсант – 40% водний розчин високомолекулярного блок-співполімеру поліакрилатів з пігментно-афінними групами марки ХYS-3600 (виробник – Yunfeng Chemical, Китай); піногасник – модифікований поліефіром полідиметилсилоксан, похідна органополісилоксану загальної формули, марки ХYS-532 (виробник – Yunfeng Chemical, Китай). Для регулювання в'язкості додавали до складу полімерного розчину – гідроксиметилцелюлозу марки М-30 000 (CAS № 9004-62-0, виробник – Shandong Welldone Environmental New Materials Co., Ltd., Китай), вміст золи не більше 5,5%, динамічна в'язкість 3.4–5 Pa·s (1% розчин, 20 °С 20 об/хв), рН- 6,0–8,5 (2% розчин, 25 °С).

Виготовляли зразки полімерних композитів на основі акрилового полімеру з однокомпонентним та двокомпонентним вуглецевим наповнювачем.

Виготовлення полімерних композитів з однокомпонентним наповнювачем відбувалось згідно рецептур (табл. 1). Для уточнення розташування порогу перколяції, для ряду композитів, додатково готували ряд зразків з концентраційним вмістом однокомпонентного наповнювача наближеним до порогу перколяції.

Таблиця 1

Загальні рецептури композитів на основі акрилового полімеру з однокомпонентним наповнювачем, об. %

Компонент	Полімерна композиція							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Вуглецевий однокомпонентний наповнювач	3	6	8	10	20	35	50	70
Полімер та добавки*	97	94	92	90	80	65	50	30

* де вміст добавок складає: дисперсант – 7,5 об. %, піногасник – 0,52 об. %, регулятор в'язкості – 2,6 об. %. від вмісту наповнювача у композиті.

Полімерні композити з двокомпонентним наповнювачем готували певного концентраційного наповнення, а саме: 50, 60, 70 об. %. Вміст добавок у композитах, складає: дисперсант – 7,5 об. %, піногасник – 0,52 об. %, регулятор в'язкості – 2,6 об. %. від загального

вмісту наповнювача. Для кожної концентрації двокомпонентного наповнювача виготовляли ряд полімерних композитів з різним співвідношення складових наповнювача, що наведені у табл. 2.

Таблиця 2

**Співвідношення складових двокомпонентного наповнювача
у композитах на основі акрилового полімеру, об. част.**

Наповнювач	Співвідношення компонентів										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
КГП С-1 або вуглецеве волокно Т300	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Технічний вуглець №330	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Приготування зразків композитів відбувалось за допомогою швидкісного міксеру занурюваного типу зі швидкістю обертання ротора 2500 об/хв та діаметром імелера 35 мм типу фреза. Спочатку у ємність для змішування наливали відповідну кількість води – 1 об. частки від загального вмісту вуглецевого наповнювача у композиті. Далі у воду перемішуючи додавали, дисперсант, піногасник і змішували 2–3 хв. У отриманий розчин поступово вводили по черзі наповнювачі відповідно до рецептур та перемішували 5–15 хв. Далі поступово вводили полімерну емульсію, а потім регулятор в'язкості та перемішували до гомогенного стану (~5–10 хв).

Отримані розчини полімерних композитів наносили в один шар за допомогою лабораторного аплікатора із зазором 150 мкм на целюлозний субстрат щільністю 160 г/м². Покриття просушували при температурі 25 °С до постійної маси (~24 годин), після чого визначали їх товщину і поверхневий опір. Товщина зразків висушених покриттів визначалась з використанням мікрометра та варіювалась у діапазоні 50–90 мкм в залежності від вмісту та типу наповнювача.

Розміри та форму часточок наповнювачів, а також структуру полімерних композитів досліджували у відбитому світлі за допомогою мікроскопу МБИ-15У42. Зображення фіксувалось за допомогою цифрової фотокамери. Розміри структурних елементів визначались за допомогою об'єкт-мікрометра.

Вимірювання електропровідності проводили за 3-електродною схемою електрометром для зразків зі значенням поверхневого опору, більшим за 5·10⁴ Ом. Для реалізації методики використовували обладнання Keithley 6517А з 3-електродною коміркою ST2642-F01 (виробник Suzhou Jingge Electro nic Co., LTD, Китай), відповідно до стандарту ASTM D257-07. Вимірювання зразків зі значенням опору меншим за 5·10⁴ Ом проводили 4-електродною схемою, портативним електрометром М-3 з чотири точковим зондом ST2558В-F01-Р (виробник Suzhou Jingge Electro nic Co., LTD, Китай) згідно ASTM F1711-96.

Після розрахунку експериментальних значень електропровідності полімерних композицій в залежності від концентрації однокомпонентного наповнювача проводили їх математичну обробку на основі методу найменших квадратів залежності $lg(\sigma) \sim lg(\phi - \phi_c)$. В результаті математичної обробки отримували параметри рівняння розрахунку електропровідності згідно перколяційної теорії:

$$\sigma = \sigma_0(\phi - \phi_c)^t, \quad (1)$$

де t – критичний індекс;

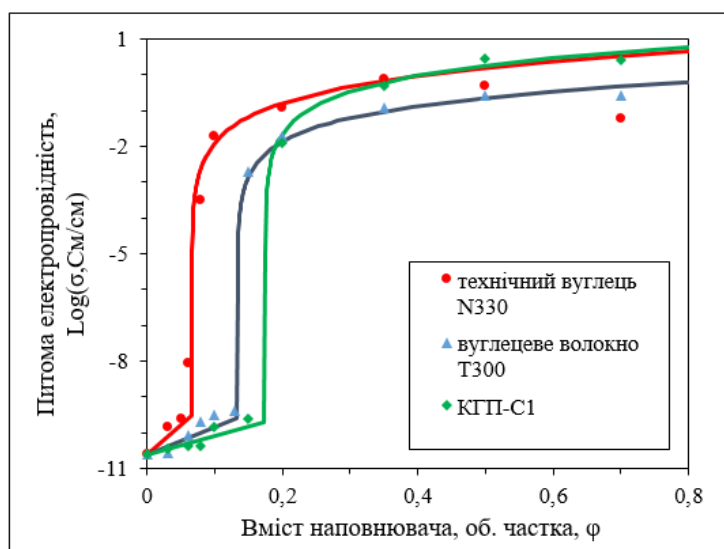
σ_0 – параметр провідності, що описує перколяційну криву після порогу перколяції;

ϕ – об'ємний вміст наповнювача (об. част.);

ϕ_c – об'ємний вміст наповнювача на порозі перколяції (об. част.).

Критичний індекс набуває значень 1,6–2,06, який в основному залежить від топологічної розмірності системи і не залежить від структури частинок, що утворюють кластери, та від їх взаємодії [25]. В результаті розрахунків за рівнянням (1) отримані значення електропровідності, порівнювали з експериментальними та будували графіки залежності електропровідності від вмісту наповнювача на їх основі.

Результати дослідження. Зростання вмісту технічного вуглецю до 6,4 об. % призводить до збільшення електропровідності акрилового полімерного композиту від $2,5 \cdot 10^{-11}$ См/см до $1,5 \cdot 10^{-9}$ См/см (рис. 1). При досягненні критичної об'ємної концентрації технічного вуглецю 6,5 об. % у фазі наповнювача з'являється тривимірний нескінченний кластер. Ця структура включає провідні безперервні ланцюги контактуючих частинок наповнювача і непровідні глухі гілки.



Позначення: точки – експериментальні значення, лінії – розрахунок згідно рівняння (1).

Рис. 1. Залежність питомої електропровідності композитів на основі акрилового полімеру від вмісту вуглецевого наповнювача

При збільшенні концентрації наповнювача – технічного вуглецю понад 35 об. % відбувається зниження електропровідності полімерного композиту від максимального значення 1,27 См/см, при вмісті 35 об. % наповнювача, до 0,05 См/см, при вмісті 70 об. %. Зменшення електропровідності пояснюється надмірним наповненням та низькою упаковкою частинок технічного вуглецю, що призводить до утворенням дефектів у вигляді тріщин по всій поверхні полімерного композиту (рис. 2).

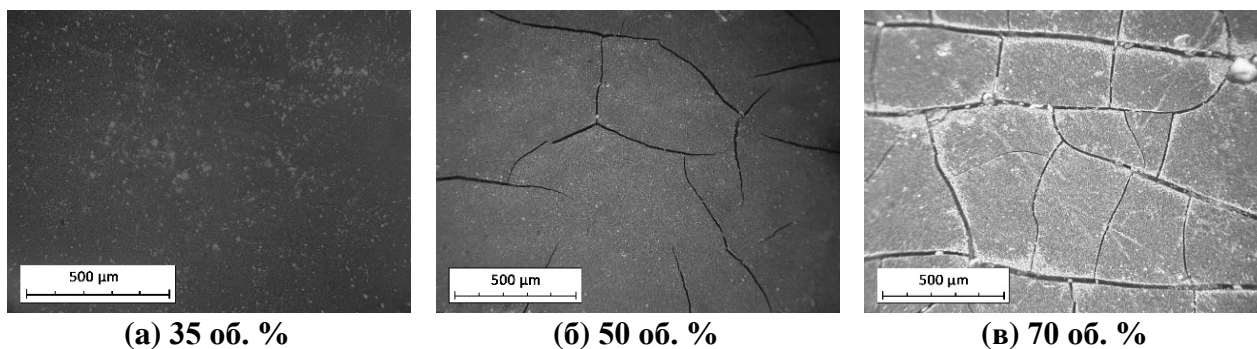


Рис. 2. Мікрофотографії покриттів полімерних композитів на основі акрилового полімеру, наповненого технічним вуглецем з вмістом наповнювача

Електропровідність між вуглецевими волокнами в полімерному композиті сильно залежить від співвідношення сторін волокон, чим вище співвідношення сторін волокон, тим вища електропровідність полімерного композиту. Волоконно-контактна модель (FCM) Вебера и Камала [26], що базується на дослідженнях Батчелора та О'Брайана [27] щодо тепло- та електропровідності матеріалів, наповнених частинками, передбачає, що контакт між волокнами – це не ідеальний контакт кінців(торців) волокон, а скоріше контакт кінця тіла (бокової поверхні) волокна до тіла, або тіла до тіла. Площа контакту для двох останніх випадків набагато менша, ніж у ідеального торцевого контакту, а отже, впливає на всю провідність композиту. Крім того, волокна можуть бути розділені тонким шаром матриці, що зі збільшенням товщини зменшує провідність полімерного композиту. Таким чином низьке співвідношення довжини волокон до їх діаметру, порівняно з роботами де використовують вуглецеві волокна довжиною приблизно 5 мм [28], призводить до того, що поріг перколяції виникає при вмісті вуглецевих волокон 13,31 об. %. Подальше збільшення вмісту вуглецевих волокон призводить до виходу електропровідності на плато з максимальним значенням 0,28 См/см.

При наповненні графітом КГП-С1 поріг перколяції утворюється при 17,90 об. %. Високий поріг перколяції пов'язаний з розміром, формою дисперсних частинок, а також щільністю упаковки. Частилки графіту мають меншу анізотропність порівняно з вуглецевими волокнами, а щільність упаковки, значно вища ніж у вуглецевих волокон та технічного вуглецю.

Таким чином, електропровідність таких полімерних композитів залежить в першу чергу від морфології наповнювача, однорідності розподілу в полімерній матриці, характеру взаємодії компонентів провідної і непровідної фаз.

Використання комбінації різних за морфологією вуглецевих наповнювачів є способом отримати збалансовані властивості матеріалу, або навіть їх посилити. Полімерні композити, що містять два різних вуглецевих наповнювача, наприклад, вуглецеві волокна і технічний вуглець, демонструють різке збільшення електропровідності [29, 30].

У роботі було синтезовано композити з двокомпонентними наповнювачами вуглецеве волокно Т300/технічний вуглець, КГП-С1/технічний вуглець з різним співвідношенням його компонентів (табл. 2). Вміст двокомпонентного наповнювача складав 50, 60 та 70 об. %, вищий за перколяційні пороги для композитів з однокомпонентними наповнювачами (рис. 1). Для композиту з двокомпонентним наповнювачем вуглецеве волокно/технічний вуглець при співвідношенні компонентів 8:2, відповідно, та загальному вмісті 70 об.% електропровідність досягає 15,82 См/см, що значно вище ніж при інших співвідношеннях компонентів наповнювача (рис. 3, а), а також при наповненні кожним компонентом окремо з вмістом наповнювача 70 об. % (рис. 1). При зміні співвідношення вуглецевих наповнювачів, зокрема при збільшенні вмісту технічного вуглецю, відбувається поступове зменшення електропровідності та менше утворення тріщин порівняно з композитами, наповненими КГП-С1/технічний вуглець (рис. 3, б). Вуглецеве волокно зміцнює структуру полімерного композиту навіть при незначній його концентрації. Два типи вуглецевих наповнювачів утворюють несучі провідні мережі, в яких волокнисті наповнювачі діють як транспортери заряду на великі відстані, а менш розмірний, розгалужений наповнювач технічний вуглець служить інтерфейсом між волокнами, утворюючи локальні провідні шляхи.

Для системи КГП-С1/технічний вуглець для кривих із загальним вмістом наповнювача 70–50 об. %, при співвідношенні відповідно 8:2 (рис. 3, б), спостерігається пікова електропровідність, відповідно при 70 об. % – 22,91 См/см, 60 об. % – 14,33 См/см, 50 об. % – 8,04 См/см, що значно вище ніж при наповненні лише графітом чи технічним вуглецем (рис. 1) при відповідних концентраціях двокомпонентного наповнювача, де значення електропровідності не більше 3 См/см. Підвищення електропровідності при співвідношенні

КГП-С1/технічний вуглець 8:2 відбувається за рахунок утворення максимально ефективної розгалуженої сітки з частинок технічного вуглецю між частинками ефективною провідної сітки з частинок графіту. Подальше заміщення графіту технічним вуглецем призводить до руйнування графітових ланцюжків та утворення тріщин за рахунок надмірної концентрації технічного вуглецю (більше 35 об. %).

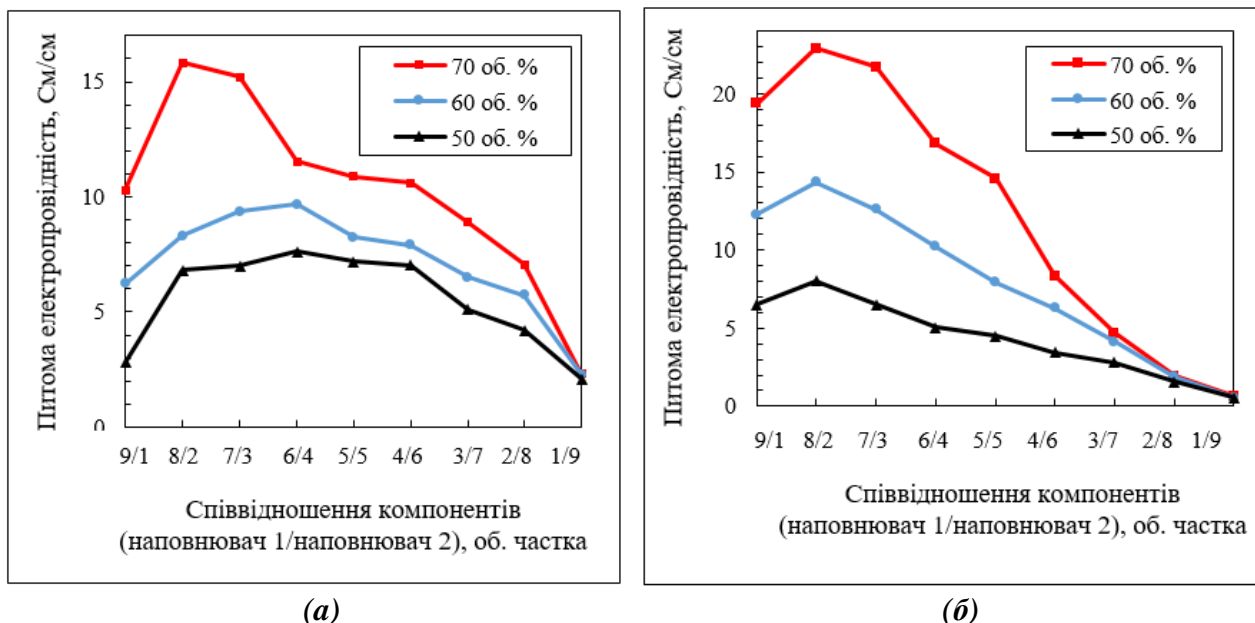


Рис. 3. Залежність електропровідності композитів наповнених вуглецеве волокно/технічний вуглець (а), КГП-С1/технічний вуглець (б) від загального вмісту двокомпонентного наповнювача та співвідношення його компонентів (компонент 1/ компонент 2)

Серед ряду синтезованих композитів з двокомпонентним наповнювачем, найвище значення електропровідності досягається для КГП-С1/технічний вуглець, 70 об. % – 22,9 См/см при співвідношенні відповідних вуглецевих матеріалів 8:2, що пов'язано з високою провідністю КГП-С1, та морфологією технічного вуглецю, яка має найнижчий поріг перколяції серед використаних наповнювачів, та утворює локальні зв'язки між частинками графіту. Для систем вуглецеве волокно/технічний вуглець і загальному вмісту наповнювача 70 об. %, максимальне значення становить 15,8 См/см при співвідношенні вуглецевих матеріалів 8:2. При певному співвідношенні кожного із компонентів двокомпонентної системи наповнювача відбувається утворення додаткових локальних ланцюжків з гронаподібних нанорозмірних частинок технічного вуглецю між частинками більш провідного мікророзмірного наповнювача графіту чи вуглецевого волокна, транспортерів заряду на дальній відстані. Таке поєднання наповнювачів призводить до синергізму системи – утворення сильнорозгалуженої перколяційної сітки з високою електропровідністю.

Висновки. В результаті проведених експериментів показано, що перколяційна поведінка провідності полімерних композитів, наповнених однокомпонентним наповнювачем, пов'язана з морфологією відповідного наповнювача та структури, яку він утворює при взаємодії з полімером. Топологія цієї структури залежить від ступеня взаємодії між полімером і поверхнею наповнювача. Найменше значення порогу перколяції показали композити, наповнені технічним вуглецем $\phi_c = 6,50$ об. %. Найвище значення порогу перколяції спостерігалось для композитів, наповнених графітом КГП-С1 $\phi_c = 17,90$ об. %. Максимальне значення електропровідності – 2,93 См/см показав композит, наповнений 50 об. % графіту

КГП-С1. Для композитів, наповнених вуглецевим волокном – $\phi_c = 13,31$ об. %, що пов'язано з низьким співвідношенням l/d волокон та особливістю утворення контактів між волокнами та взаємодії з полімером.

Синтезовані композити з двокомпонентними наповнювачами КГП-С1/технічний вуглець, вуглецеве волокно Т300/технічний вуглець з різним співвідношенням вуглецевих матеріалів та загальним наповненням в композиті 50–70 об. % показали синергетичний ефект. При поєднанні декількох наповнювачів з різними параметрами у двокомпонентну систему можна досягти підсилення властивостей кожного з компонентів завдяки їх взаємодії. Найвище значення електропровідності досягається при найменшому співвідношенні розміру частинок вуглецевих матеріалів для системи КГП-С1/технічний вуглець – 22,91 См/см при 70 об. % і співвідношенні компонентів вуглецевих матеріалів 8:2 відповідно. Дана система також характеризується більшою площею поверхні наповнювачів порівняно з системою вуглецеве волокно Т300/технічний вуглець, що послужило причиною помірною змочування введених в композит вуглецевих матеріалів за однакового вмісту полімеру та добавок.

Таким чином, максимальна електропровідність композитів з двокомпонентним наповнювачем досягається за рахунок синергетичного ефекту при певному співвідношенні компонентів наповнювача і вмісті наповнювача, що значно перевищує поріг перколяції для однокомпонентних систем наповнювача в композитах, та потребує подальших досліджень.

References

Література

1. Joseph, F. P. J., Arun, K.J., Navas, A. A., Irene, J. (2018). Biomedical Applications of Polymers—An Overview. *Curr Trends Biomedical Eng & Biosci.*, 15(2): 555909. DOI: 10.19080/CTBEB.2018.15.555909.
 2. Ekebafé, L. O., Ogbeifun, D. E., Okieimen, F. E. (2011). Polymer applications in agriculture. *Biokemistri*, 23(2).
 3. Akelah, A. (2013). Polymers in Food Processing Industries. In: *Functionalized Polymeric Materials in Agriculture and the Food Industry* (pp.195–248). Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7061-8_4.
 4. Dworak, A., Utrata-Wesołek, A., Otulakowski, Ł., Kasprów, M., Trzebicka, B. (2021). Polymers in medicine – direction of development. *Polimery*, 64(10): 645–655. <https://doi.org/10.14314/polimery.2019.10.1>.
 5. Choi, H. J., Kim, M. S., Ahn, D., Yeo, S. Y., Lee, S. (2019). Electrical percolation threshold of carbon black in a polymer matrix and its application to antistatic fibre. *Scientific reports*, 9(1): 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42495-1>.
 6. Forintos, N., Czigany, T. (2019). Multifunctional application of carbon fiber reinforced polymer composites: Electrical properties of the reinforcing carbon fibers—A short review. *Composites Part B: Engineering*, 162: 331–343. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.098>.
 7. Wei, B., Yang, S. (2021). Polymer composites with expanded graphite network with superior thermal conductivity and electromagnetic interference shielding
1. Joseph F. P. J., Arun K.J., Navas A. A., Irene J. Biomedical Applications of Polymers—An Overview. *Curr Trends Biomedical Eng & Biosci.* 2018. No. 15(2): 555909. DOI: 10.19080/CTBEB.2018.15.555909.
 2. Ekebafé L. O., Ogbeifun D. E., Okieimen F. E. Polymer applications in agriculture. *Biokemistri.* 2011. No. 23(2).
 3. Akelah, A. Polymers in Food Processing Industries. In: *Functionalized Polymeric Materials in Agriculture and the Food Industry*. Springer, Boston, MA., 2013. P. 195–248. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7061-8_4.
 4. Dworak A., Utrata-Wesołek A., Otulakowski Ł., Kasprów M., Trzebicka B. Polymers in medicine – direction of development. *Polimery.* 2021. No. 64(10). P. 645–655. <https://doi.org/10.14314/polimery.2019.10.1>.
 5. Choi H. J., Kim M. S., Ahn D., Yeo S. Y., Lee S. Electrical percolation threshold of carbon black in a polymer matrix and its application to antistatic fibre. *Scientific reports.* 2019. No. 9(1). P. 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42495-1>.
 6. Forintos N., Czigany T. Multifunctional application of carbon fiber reinforced polymer composites: Electrical properties of the reinforcing carbon fibers—A short review. *Composites Part B: Engineering.* 2019. No. 162. P. 331–343. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.098>.
 7. Wei B., Yang S. Polymer composites with expanded graphite network with superior thermal conductivity and electromagnetic interference

- performance. *Chemical Engineering Journal*, 404: 126437. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126437>.
8. Malm, V., Seoane, F., Nierstrasz, V. (2019). Characterisation of electrical and stiffness properties of conductive textile coatings with metal flake-shaped fillers. *Materials*, 12(21): 3537. <https://doi.org/10.3390/ma12213537>.
9. Narkis, M., Zilberman, M., Siegmann, A. (1997). On the "curiosity" of electrically conductive melt processed doped-polyaniline/polymer blends versus carbon-black/polymer compounds. *Polymers for Advanced Technologies*, 8(8): 525–528.
10. Aguilar, M. R., San Román, J. (2019). Introduction to smart polymers and their applications. In *Smart polymers and their applications*. Woodhead Publishing, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102416-4.00001-6>.
11. Frydman, E. UK Patent 604695, 1948, 8.
12. Scarisbrick, R. M. (1973). Electrically conducting mixtures. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 6(17): 2098.
13. Chu, X., Chen, G., Xiao, X., Wang, Z., Yang, T., Xu, Z., ... Chen, J. (2021). Air-Stable Conductive Polymer Ink for Printed Wearable Micro-Supercapacitors. *Small*, 17(25): 2100956. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22528-y>.
14. Gupta, S., Tai, N. H. (2019). Carbon materials and their composites for electromagnetic interference shielding effectiveness in X-band. *Carbon*, 152: 159–187. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.06.002>.
15. Paul, R., Parvathy, P. A., Vijayan, S. P., John, B., Sahoo, S. K. (2022). Biobased conducting polymer composites for electromagnetic interference shielding and electronics applications. *Conjugated Polymers for Next-Generation Applications*, P. 215–237. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823442-6.00006-4>.
16. Liu, X., Li, C., Pan, Y., Schubert, D. W., Liu, C. (2019). Shear-induced rheological and electrical properties of molten poly (methyl methacrylate)/carbon black nanocomposites. *Compos. Part B Eng.*, 164: 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.054>.
17. Liu, X., Pan, Y., Zheng, G., Schubert, D. W. (2016). Rheological and electrical behavior of poly (methyl methacrylate)/carbon black composites as investigated by creep recovery in shear. *Compos. Sci. Technol.*, 128: 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.03.011>.
- shielding performance. *Chemical Engineering Journal*. 2021. No. 404: 126437. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126437>.
8. Malm V., Seoane F., Nierstrasz V. Characterisation of electrical and stiffness properties of conductive textile coatings with metal flake-shaped fillers. *Materials*. 2019. No. 12(21): 3537. <https://doi.org/10.3390/ma12213537>.
9. Narkis M., Zilberman M., Siegmann A. On the "curiosity" of electrically conductive melt processed doped-polyaniline/polymer blends versus carbon-black/polymer compounds. *Polymers for Advanced Technologies*. 1997. No. 8(8). P. 525–528.
10. Aguilar M. R., San Román J. Introduction to smart polymers and their applications. In *Smart polymers and their applications*. Woodhead Publishing. 2019. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102416-4.00001-6>.
11. Frydman E. UK Patent 604695, 1948, 8.
12. Scarisbrick R. M. Electrically conducting mixtures. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1973. No. 6(17): 2098.
13. Chu X., Chen G., Xiao X., Wang Z., Yang T., Xu Z., ... Chen J. Air-Stable Conductive Polymer Ink for Printed Wearable Micro-Supercapacitors. *Small*. 2021. No. 17(25): 2100956. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22528-y>.
14. Gupta S., Tai N. H. Carbon materials and their composites for electromagnetic interference shielding effectiveness in X-band. *Carbon*. 2019. No. 152. P. 159–187. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.06.002>.
15. Paul R., Parvathy P. A., Vijayan S. P., John B., Sahoo S. K. Biobased conducting polymer composites for electromagnetic interference shielding and electronics applications. *Conjugated Polymers for Next-Generation Applications*. 2022. P. 215–237. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823442-6.00006-4>.
16. Liu X., Li C., Pan Y., Schubert D. W., Liu C. Shear-induced rheological and electrical properties of molten poly (methyl methacrylate)/carbon black nanocomposites. *Compos. Part B Eng.* 2019. No. 164. P. 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.054>.
17. Liu X., Pan Y., Zheng G., Schubert D. W. Rheological and electrical behavior of poly (methyl methacrylate)/carbon black composites as investigated by creep recovery in shear. *Compos.*

18. Li, Y., Zhou, B., Zheng, G. et al. (2018). Continuously prepared highly conductive and stretchable SWNT/MWNT synergistically composited electrospun thermoplastic polyurethane yarns for wearable sensing. *Journal of Materials Chemistry C*, 6: 2258–2269. <https://doi.org/10.1039/c7tc04959e>.
19. Sha, L., Chen, Z., Chen, Z., Zhang, A., Yang, Z. (2016). Polylactic Acid Based Nanocomposites: Promising Safe and Biodegradable Materials in Biomedical Field. *Int. J. Polym. Sci.*, 2016: 1–11. <https://doi.org/10.1155/2016/6869154>.
20. Flandin, L., Brechet, Y., Cavaillé, J. Y. (2001). Electrically conductive polymer nanocomposites as deformation sensors. *Composites Science and Technology*, 61(6): 895–901. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00175-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00175-5).
21. Mohanraj, G. T., Chaki, T. K., Chakraborty, A., Khastgir, D. (2004). Effect of some service conditions on the electrical resistivity of conductive styrene–butadiene rubber–carbon black composites. *Journal of applied polymer science*, 92(4): 2179–88. <https://doi.org/10.1002/app.20227>.
22. Lux, F. (1993). Models proposed to explain the electrical conductivity of mixtures made of conductive and insulating materials. *Journal of materials science*, 28: 285–301. <https://doi.org/10.1007/BF00357799>.
23. Kirkpatrick, S. (1973). Percolation and conduction. *Reviews of modern physics*, 45(4): 574. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.45.574>.
24. Miyasaka, K., Watanabe, K., Jojima, E. et al. (1982). Electrical conductivity of carbon-polymer composites as a function of carbon content. *J Mater Sci*, 17: 1610–1616. <https://doi.org/10.1007/BF00540785>.
25. Efros, A. L., Shklovskii, B. I. (1976). Critical Behaviour of Conductivity and Dielectric Constant near the Metal-Non-Metal Transition Threshold. *Physica Status Solidi*, 76(2): 475. <https://doi.org/10.1002/pssb.2220760205>.
26. Weber, M., Kamal, M. (1997). Estimation of the volume resistivity of electrically conductive composites. *Polym Compos*, 18: 711. <https://doi.org/10.1002/pc.10324>.
27. Batchelor, G. K., O'brien, R. W. (1977). Thermal or electrical conduction through a granular material. *Proceedings of the Royal Society A. Mathematical and Physical Sciences*, 355(1682): 313–333. <http://doi.org/10.1098/rspa.1977.0100>.
- Sci. Technol.* 2016. No. 128: 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.03.011>.
18. Li Y., Zhou B., Zheng G. et al. Continuously prepared highly conductive and stretchable SWNT/MWNT synergistically composited electrospun thermoplastic polyurethane yarns for wearable sensing. *Journal of Materials Chemistry C*. 2018. No. 6. P. 2258–2269. <https://doi.org/10.1039/c7tc04959e>.
19. Sha L., Chen Z., Chen Z., Zhang A., Yang Z. Polylactic Acid Based Nanocomposites: Promising Safe and Biodegradable Materials in Biomedical Field. *Int. J. Polym. Sci.* 2016. No. 2016. P. 1–11. <https://doi.org/10.1155/2016/6869154>.
20. Flandin L., Brechet Y., Cavaillé J. Y. Electrically conductive polymer nanocomposites as deformation sensors. *Composites Science and Technology*. 2001. No. 61(6). P. 895–901. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00175-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00175-5).
21. Mohanraj G. T., Chaki T. K., Chakraborty A., Khastgir D. Effect of some service conditions on the electrical resistivity of conductive styrene–butadiene rubber–carbon black composites. *Journal of applied polymer science*. 2004. No. 92(4). P. 2179–2188. <https://doi.org/10.1002/app.20227>.
22. Lux F. Models proposed to explain the electrical conductivity of mixtures made of conductive and insulating materials. *Journal of materials science*. 1993. No. 28. P. 285–301. <https://doi.org/10.1007/BF00357799>.
23. Kirkpatrick S. Percolation and conduction. *Reviews of modern physics*. 1973. No. 45(4): 574. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.45.574>.
24. Miyasaka K., Watanabe K., Jojima E. et al. Electrical conductivity of carbon-polymer composites as a function of carbon content. *J Mater Sci*. 1982. No. 17. P. 1610–1616. <https://doi.org/10.1007/BF00540785>.
25. Efros A. L., Shklovskii B. I. Critical Behaviour of Conductivity and Dielectric Constant near the Metal-Non-Metal Transition Threshold. *Physica Status Solidi*. 1976. No. 76(2): 475. <https://doi.org/10.1002/pssb.2220760205>.
26. Weber M., Kamal M. Estimation of the volume resistivity of electrically conductive composites. *Polym Compos*. 1997. No. 18: 711. <https://doi.org/10.1002/pc.10324>.
27. Batchelor G. K., O'brien R. W. Thermal or electrical conduction through a granular material. *Proceedings of the Royal Society A. Mathematical and Physical Sciences*. 1977. No. 355(1682). P. 313–333. <http://doi.org/10.1098/rspa.1977.0100>.

8. Wen, S., Chung, D. D. L. (2001). Double percolation in the electrical conduction in carbon fiber reinforced cement-based materials. *Carbon*, 45(2): 263–267. DOI: 10.1016/j.carbon.2006.09.031.
29. Drubetski, M., Siegmann, A., Narkis, M. (2005). Hybrid particulate and fibrous injection molded composites: Carbon black/carbon fiber/polypropylene systems. *Polymer composites*, 26(4): 454–464. <https://doi.org/10.1002/pc.20116>.
30. Lee, J. H., Kim, S. K., Kim, N. H. (2006). Effects of the addition of multi-walled carbon nanotubes on the positive temperature coefficient characteristics of carbon-black-filled high-density polyethylene nanocomposites. *Scripta Materialia*, 55(12): 1119–1122. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.08.051>.
28. Wen S., Chung D. D. L. Double percolation in the electrical conduction in carbon fiber reinforced cement-based materials. *Carbon*. 2007. No. 45(2). P. 263–267. DOI: 10.1016/j.carbon.2006.09.031.
29. Drubetski M., Siegmann A., Narkis M. Hybrid particulate and fibrous injection molded composites: Carbon black/carbon fiber/polypropylene systems. *Polymer composites*. 2005. No. 26(4). P. 454–464. <https://doi.org/10.1002/pc.20116>.
30. Lee J. H., Kim S. K., Kim N. H. Effects of the addition of multi-walled carbon nanotubes on the positive temperature coefficient characteristics of carbon-black-filled high-density polyethylene nanocomposites. *Scripta Materialia*. 2006. No. 55(12). P. 1119–1122. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.08.051>.

KURYPTIA YAROSLAV

Candidate of Engineering Sciences, Senior Research Officer, Department of Electrochemical Power Engineering and Chemistry, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6181-644X>
Scopus Author ID: 57192820834
ResearcherID: AAJ-7175-2021
E-mail: yarik_lg@ukr.net

BARSUKOV VIACHESLAV

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of Department of Electrochemical Power Engineering and Chemistry, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3041-2474>
Scopus Author ID: 8590938100
ResearcherID: O-6308-2017
E-mail: y-barsukov@i.ua

SENYK ILONA

Candidate of Engineering Sciences, Senior Research Officer, Department of Electrochemical Power Engineering and Chemistry, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9522-0238>
Scopus Author ID: 55813761700
E-mail: ilona_senyk@i.ua

KHOMENKO VOLODYMYR

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Electrochemical Power Engineering and Chemistry, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0013-8010>
Scopus Author ID: 7004402598
ResearcherID: X-2214-2018
E-mail: y.khomenko@i.ua

KURYPTIA Y. A., SENIK I. V., BARSUKOV V. Z., KHOMENKO V. G.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

INFLUENCE OF PARAMETERS OF ONE-COMPONENT AND TWO-COMPONENT CARBON FILLER ON THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF ACRYLIC POLYMER COMPOSITE COATING

Purpose. Research of the influence of the parameters of one- and two-component carbon filler on the electrical conductivity of acrylic polymer composite in the form of a thin coating.

Methodology. Samples of composites were developed using a high-speed mixer. The size and shape of the filler particles, as well as the structure of polymer composites, were examined in reflected light using a microscope MBI-15U42. The electrical conductivity of the samples obtained was measured according to ASTM D257-07 and ASTM F1711-96 standards in accordance with the surface resistance of the samples.

Findings. The percolation thresholds for composites, which were filled by a one-component filler – technical carbon, graphite KGP-C1, carbon fiber – were determined. As a result of the experiments, it was shown that the percolation behavior of the conductivity of polymer composites, filled with a single-component

filler is related to the morphology of the corresponding filler and the internal structure that it forms when interacting with the polymer. Synthesized polymer composites with two-component fillers KGP-S/technical carbon or carbon fiber T300/technical carbon, and different ratios of them and total filling in the composite 50–70 vol. % showed a synergistic effect of electrical conductivity at a specific ratio of filler components.

Originality. The relationship between the ratio of components of a carbon two-component filler and electrical conductivity of an acrylic polymer composite has been established.

Practical value. The optimal pair of carbon fillers, their content and the ratio of the two-component filler in the acrylic polymer composite are determined.

Keywords: percolation threshold, carbon filler, two-component filler, electrical conductivity, polymer composite.