

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.5.10>

УДК 678.679:2

СВИСТІЛЬНИК Р. Ф., ФЕДОРІВ Т. Р.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ВПЛИВ ПОЛІМЕРНИХ МАТРИЦЬ НА ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИТНИХ ПОКРИТТІВ

Мета дослідження. З'ясувати вплив полімерної матриці на електричні властивості композитного покриття на основі електропровідного вуглецевого наповнювача.

Методи дослідження: Вимірювання питомого поверхневого та об'ємного електричного опору здійснювалось на чотирьох електродній комірці за методом Кельвіна. Динамічну в'язкість розчину полімерної матриці вимірювали на ротаційному віскозиметрі VEVOR марки NDJ-9S. Вимірювання сухого залишку розчину композитного покриття проводилось ваговим методом.

Результати. Встановлено вплив полімерних матриць на електричні властивості композитного полімерного покриття. Виявлено, що найнижчий поверхневий та об'ємний електричний опір спостерігається у композитного покриття на основі нітроцелюлози (НЦ), що ймовірно пов'язано з наявністю у полімерної матриці високо полярних нітро груп.

Найвищий поверхневий та об'ємний електричний опір спостерігається при використанні полімерної матриці – бакелітова смола (БС). Для композитних покриттів з комбінованою полімерною матрицею на основі полівінілбутиралу (ПВБ) та 5% і 10% бакелітової смоли (БС) спостерігається більш низьке значення опору при вмісті 5% БС та підвищення електричного опору при вмісті БС 10% в порівнянні з композитним покриттям на основі полівінілбутиралу (ПВБ).

Вибір конкретної полімерної матриці для електропровідного композитного покриття визначається її специфічними властивостями, зокрема, міцність, хімічна стійкість, вогнестійкість.

Наукова новизна. Встановлено вплив полімерної матриці на питомий електричний опір композитних покриттів.

Практична значимість. Результати отриманих досліджень дозволять вибирати потрібну полімерну матрицю для гнучких нагрівальних елементів в залежності від їх застосування.

Ключові слова: полівінілбутираль (ПВБ); нітроцелюлоза (НЦ); поліуретан (ПУ); бакелітова смола (БС); електропровідний наповнювач; електропровідні покриття; сажа; графіт.

Вступ. Були проведені численні дослідження, спрямовані на вивчення впливу полімерних матриць на електропровідність композитних полімерних покриттів [1]. Так, взаємодія між матрицею та електропровідним наповнювачем, таким як вуглецеві нанотрубки або графен, може впливати на розподіл та орієнтацію наповнювача в полімері. Це, в свою чергу, може впливати на загальну електропровідність композиту.

Морфологічні зміни в композиті, зумовлені різними полімерними матрицями, можуть впливати на створення електричних шляхів між наповнювачами. Різні полімерні матриці викликають різні морфологічні структури в композитах, що може сприяти або заважати утворенню зв'язних електричних шляхів між наповнювачами, впливаючи таким чином на їх загальну провідність [2].

Полімерні матриці можуть впливати на термічну стабільність електропровідних композитних полімерів, впливаючи на їх електричні властивості при підвищених температурах. Визначили, що вибір полімерної матриці суттєво впливає на термічну стабільність композитів, і деякі матриці можуть забезпечити збереження електропровідності при підвищених температурах краще за інші.

Додавання пластифікаторів до полімерної матриці може впливати на електричну провідність композиту, змінюючи його гнучкість і мобільність ланцюгів. За допомогою пластифікаторів в полімерній матриці можна регулювати електричні характеристики композиту, адаптуючи його структурну гнучкість та динаміку молекулярних ланцюгів [3].

Дослідження, які фокусуються на вивченні порогу перколяції – мінімальної концентрації електропровідного наповнювача, при якій матеріал починає проявляти збільшену електропровідність [4]. Деякі дослідження зосереджувалися на тому, як полімерна матриця може впливати на механічні властивості електропровідних композитів, таких як міцність на розтяг, модуль пружності та в'язкість [5]. Полімерна матриця суттєво впливає на механічні властивості електропровідних композитів, визначаючи їх міцність, модуль пружності та в'язкість. Вибір відповідної матриці може оптимізувати ці характеристики в залежності від конкретного застосування.

Різні полімерні матриці впливають на діелектричну проникливість та діелектричні втрати композитних матеріалів. Вибір матриці може змінювати ці характеристики, оптимізуючи їх для конкретних застосувань в електроніці та електротехніці.

Досліджували можливість використання світлочутливих полімерних матриць для створення електропровідних шарів шляхом фотополімеризації [6]. Світлочутливі полімерні матриці демонструють потенціал для створення електропровідних шарів за допомогою фотополімеризації, що відкриває нові перспективи для дизайну та виробництва електронних пристроїв і матеріалів.

Використання блок-співполімерів як матриць для розподілу електропровідних наповнювачів, забезпечує кращий контроль над морфологією та електричними властивостями композитів [7].

Попередня хімічна обробка та модифікації поверхні наповнювачів впливає на їх адгезію до полімерної матриці, що може оптимізувати або погіршувати електропровідні властивості кінцевого композиту.

Також зовнішні умови, особливо температура та вологість, можуть суттєво впливати на електропровідність композитів, причому реакція на ці фактори відрізняється в залежності від використовуваної полімерної матриці [8].

Вибір полімерної матриці впливає на загальні механічні та електричні властивості композитного покриття. Різні полімери мають різну структуру, модуль пружності, температурну стійкість і хімічні властивості, які можуть впливати на ефективність електропровідності композиту [9].

Полімерні матриці можуть забезпечити ефективне з'єднання між наповнювачами, забезпечуючи краще розсіювання та інтерфейс між компонентами, що сприяє кращій електропровідності.

Модифікація полімерних матриць, шляхом функціоналізації або змішування різних полімерів, може вдосконалювати властивості композитних матеріалів. Наприклад, додавання певних хімічних груп до полімерної матриці може збільшити її адгезію до наповнювачів, підвищуючи електропровідність [10]. Додавання різних полімерних матриць може забезпечити поєднання властивостей обох матриць, що веде до отримання композитів з кращими характеристиками порівняно з композитами на основі одного полімеру.

Таким чином, дослідження впливу виду полімерної матриці та їх поєднання на електропровідні властивості композитних полімерних покриттів є актуальним завданням в напрямку створення електропровідних композитних покриттів.

Постановка завдання. Метою роботи є створення електропровідних композитних полімерних покриттів з доступних полімерних матриць з максимальними електропровідними властивостями. Вивчення впливу різних полімерних матриць на електропровідні властивості композитів дозволить обрати полімерну матрицю яка буде відповідати вимогам для виготовлення гнучких полімерних нагрівачів.

Вихідні матеріали та методи. Для досліджень було використано електропровідні наповнювачі – колоїдний графітовий препарат марки С-0 (ТОВ «Завалівський графіт») та електропровідна сажа марки ХС 72 Cabot Corporation. Як полімерні матриці використовували

полівінілбутираль (ПВБ) марки SDW-3A, бакелітову смолу (БС) (фенол формальдегідна смола резольного типу), нітроцелюлозу (НЦ) марки А-400, поліуретан (ПУ) марки Varnish primer P-OPP met gravure у вигляді 10% розчинів у ізопропіловому спирті. Як допоміжну речовину при отриманні покриттів застосовували ізопропіловий спирт технічний.

Виходячи з попередніх проведених досліджень було обрано композицію з 30% вмістом полімерної матриці та електропровідних наповнювачів – графіту 60% та сажі 10% [11]. Рецептний склад досліджуваних композицій наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Рецептурний склад досліджуваних полімерних композицій

№ композиції	Вміст компонентів, % мас.					
	Полімерна матриця				Наповнювач	
	ПВБ	БС	НЦ	ПУ	Графіт	Сажа ХС 72
1	30	-	-	-	60	10
2	25	5	-	-	60	10
3	20	10	-	-	60	10
4	-	30	-	-	60	10
5	-	-	30	-	60	10
6	-	-	-	30	60	10

Вибір видів полімерних матриць здійснювали, враховуючи їх широке застосування у промислових процесах та унікальні хімічні та фізичні властивості.

ПВБ було обрано через високий рівень хімічної стійкості та відмінну адгезію до поверхні субстрату, що визначає його потенціал як перспективну полімерну матрицю. НЦ обрана для дослідження через її здатність до ефективного нанесення на поверхню субстрату та ймовірного вмісту нітратних функціональних груп, які можуть суттєво впливати на характеристики покриття. ПУ був включений у дослідження завдяки його високій міцності та стійкості до зношування, а також через наявність кон'югованих функціональних груп, які можуть визначити його провідні властивості. БС була розглянута з урахуванням її теплоізоляційних характеристик та вогнестійкості.

Для приготування композицій було використано лабораторне устаткування – верхньопривідний змішувач марки ІКА RW20 (діаметр дисольверної мішалки – 50 мм).

Технологія отримання електропровідного полімерного покриття складається з кількох стадій. Спочатку проводилось змішування порошкоподібних наповнювачів з розчинниками на верхньопривідному змішувачі протягом 20 хв. Далі додавалась електропровідна сажа та графіт у вигляді попередньо приготованої пасти на тривалковій фарботерці марки Ехакт-50. Отриману суміш гомогенізували з використанням дисперсеру марки ФСХ-2А протягом 15 хв. Швидкість обертання мішалки – 1800 об/хв. Сухий залишок фарби становив 25%мас., що контролювали ваговим методом.

В'язкість фарби контролювали за віскозиметром типу «келих» з діаметром отвору 4мм за ISO 2431. В'язкість фарби підтримували в діапазоні 20–30 с шляхом введення розчинника.

Отриману однорідну суміш наносили на субстрат - плівку з поліетилентерефталату за допомогою роликкового аплікатору роблячи 5-7 проходів роликком та задаючи товщину 100 мкм. Нанесення покриття висушували протягом 24 год при температурі 25°C та відносній вологості 75%.

Вимірювання електричного опору здійснювали за 4-х електродною схемою – методом Кельвіна з використанням комірки марки JG та приладу марки RS pro міліомметр RM-804. Радіус електрода (r) вимірювальної комірки – 0,035 см. Відстань між електродами (L) – 0,2 см. Ширина електрода (W) – 0,07 см. Площа поперечного перерізу електрода (A) – 0,00385см².

Питомий поверхневий електричний опір визначали за формулою [12]:

$$R_s = R \times \frac{L}{W}. \quad (1)$$

Питомий об'ємний електричний опір визначали за формулою [12]:

$$\rho = R \times \frac{L}{A}. \quad (2)$$

Результати досліджень. Отримані розчини полімерних матриць та розроблені композиції порівнювали за в'язкістю з використанням віскозиметру VEVOR марки NDJ-9S 10-600000000 мПа*с при швидкості обертання 60 обертів за хвилину (табл. 2).

Таблиця 2

Динамічна в'язкість 10% розчинів полімерних матриць та досліджуваних композицій

№ п/п	Назва досліджуваного зразка	Динамічна в'язкість, 10^{-6} Па·с
1	ПВБ	97,2
2	БС	2,74
3	НЦ	29,2
4	ПУ	19,1
5	Композиція №1	203,0
6	Композиція №2	193,1
7	Композиція №3	182,4
8	Композиція №4	10,2
9	Композиція №5	78,6
10	Композиція №6	72,3

В'язкість полімерних розчинів відіграє ключову роль при розробці електропровідних фарб. Висока в'язкість може ускладнювати процес нанесення та вимагає застосування спеціального обладнання. Навпаки, низька в'язкість полегшує нанесення, але може вплинути на стійкість покриття. У більш в'язких системах тверді наповнювачі, такі як сажа або графіт, менше схильні до осадження, забезпечуючи тим самим більш рівномірний розподіл провідних частинок у розчині полімерної матриці. Під час нанесення цих в'язких систем, тверді частинки провідного матеріалу, такі як сажа або графіт, демонструють знижену тенденцію до агломерації, сприяючи оптимальному розподілу електропровідного наповнювача на поверхні субстрату, що покращує провідність електропровідних покриттів. Низька в'язкість рідини може сприяти більш швидкому розподілу і рівномірному нанесенню електропровідного покриття на поверхню субстрату. Це, в свою чергу, може забезпечити більш однорідне покриття без локальних дефектів чи нерівностей. Таке однорідне покриття може знизити внутрішній опір і, отже, забезпечити кращі електричні властивості. Швидке висихання може запобігти розсіюванню або руху частинок наповнювача в рідині, що додатково вдосконалює структуру покриття.

Вплив полімерної матриці на електропровідність композитних полімерних покриттів наведені в таблиці 3.

На підставі даних з таблиці 2 стає зрозумілим, що композиція №5, розроблена на базі НЦ, характеризується мінімальним питомим поверхневим електричним опором. Ця висока провідність у 2,4 рази перевищує показники композиції №1, створеної на основі ПВБ. Імовірно, така відмінність зумовлена присутністю нітро груп у НЦ та його здатністю швидко висихати завдяки низькій динамічній в'язкості.

Композиція №2 характеризується питомим поверхневим електричним опором, який у 1,4 рази нижчий в порівнянні з композицією №1. Це може бути обумовлено заміною 5% ПВБ

на БС. Ймовірно, інтеграція бакелітової смоли впливає на структуру ПВБ, змінює розподіл фаз і між фазні взаємодії. Такі зміни ймовірно можуть формувати нові електропровідні шляхи або сприяти більш ефективному руху зарядів крізь матеріал, що, у свою чергу, призводить до зниження опору.

Таблиця 3

Питомий поверхневий та об'ємний електричний опір досліджуваних композицій

№ композиції	Питомий об'ємний електричний опір, Ом•см	Питомий поверхневий електричний опір, Ом
1	429	24
2	323	18
3	447	25
4	718	40
5	182	10
6	373	21

Композиція №3 має питомий поверхневий електричний опір, який є не значно вищим в порівнянні з композицією №1, незважаючи на додавання 10% БС. Взаємодія між компонентами в композиції відіграє ключову роль. У малих дозах БС може сприяти поліпшенню властивостей матеріалу, проте при великому його вмісті можливий небажаний вплив на полімерну матрицю.

Композиція №4, на основі БС, має питомий поверхневий електричний опір, який у 1,7 рази вищий порівняно з іншими зразками. Композиція №6, на основі ПУ, має питомий поверхневий електричний опір, що майже 15% нижчий в порівнянні з композицією №1 на основі ПВБ. Встановлення причин такого впливу вказаних матриць потребує подальших досліджень.

Досліджені полімерні матриці для електропровідних композитних покриттів виявляють широкий спектр можливих застосувань, в залежності від їх унікальних електропровідних властивостей та фізичних характеристик.

Полімерна матриця ПВБ в поєднанні з електропровідним наповнювачем, з питомим поверхневим електричним опором 36,5 Ом, може бути застосована для електронних пристроїв, де акцент ставиться на якісну адгезію до різноманітних поверхонь та стабільність в різних умовах. Цей полімер не лише гарантує надійність та довговічність компонентів, але й сприяє покращенню їхніх механічних характеристик. ПВБ забезпечує стабільну електропровідність, що є критично важливим для ефективної роботи електронних систем.

Полімерна матриця БС в поєднанні з електропровідним наповнювачем, володіє найвищим питомим поверхневим електричним опором серед обраних полімерних матриць 62,1 Ом, зарекомендувала себе як важливий компонент у виробництві електротехнічних виробів. Її унікальні властивості, зокрема вогнестійкість та електрична ізоляція, роблять її незамінним у ситуаціях, де потрібна максимальна безпека та надійність. Такий високий електричний опір гарантує захист від теплових впливів та електричних розрядів, а також забезпечує стабільність роботи обладнання в різних умовах. Це особливо важливо для високонавантажених систем, де будь-який збій може призвести до критичних наслідків.

Полімерна матриця НЦ у поєднанні з електропровідним наповнювачем, маючи найнижчий питомий поверхневий електричний опір серед обраних композицій 15,35 Ом та можливість формувати тонкі плівки, є ефективним рішенням в області новітніх технологій. Вона активно використовується у виробництві сенсорів, дисплеїв, а також інших електронних компонентів. Висока електропровідність, поєднана з стійкістю до різних умов експлуатації, робить її відмінним вибором для електронних пристроїв, де якість, надійність та тривалий термін служби є вирішальними.

Полімерна матриця ПУ у поєднанні з електропровідним наповнювачем, має питомий поверхневий електричний опір 32,2 Ом, відзначається унікальною комбінацією міцності та еластичності. Цей матеріал може витримувати великі механічні навантаження та події знесення, стаючи оптимальним вибором там, де потрібно поєднати електропровідність з відмінною міцністю. Це зокрема актуально для розробки електропровідних покриттів у сфері побутової інженерії, де вимагається висока стійкість до механічних пошкоджень та агресивних зовнішніх факторів. Такий потенціал ПУ робить його цінним в сучасних технологічних рішеннях.

Також під час заміни частки полімерної матриці ПВБ на полімерну матрицю БС в співвідношенні 25% ПВБ до 5% БС і в поєднанні з електропровідним наповнювачем було отримано нижчий питомий поверхневий електричний опір, порівняно з немодифікованою полімерною матрицею ПВБ або БС у поєднанні з електропровідним наповнювачем. Це свідчить про високі якості модифікації різних полімерних матриць. Такі комбінації можуть формувати нові електропровідні мережі в композитних полімерах і поєднувати хімічні властивості обох полімерних матриць. Це може виявитися корисним при створенні гнучких нагрівальних елементів.

Висновки. Відповідно до отриманих результатів досліджень, найнижчий поверхневий та об'ємний електричний опір спостерігається у композитного покриття на основі нітроцелюлози, який становить відповідно 10 Ом та 182 Ом·см, що ймовірно пов'язано з наявністю у полімерної матриці високо полярних нітро груп.

Найвищий поверхневий та об'ємний електричний опір спостерігається при використанні полімерної матриці – бакелітова смола і становить відповідно 40 Ом та 718 Ом см. Для композитних покриттів з комбінованою полімерною матрицею на основі полівінілбутиралу та 5% бакелітової смоли спостерігається зниження питомого електричного опору в 1,3 рази порівняно з композицією на основі полівінілбутиралу, що дозволяє використовувати бакелітову смолу як модифікатор композиції. При підвищенні вмісту бакелітової смоли до 10% питомий електричний опір зростає на 4% в порівнянні з композитним покриттям на основі полівінілбутиралу.

Отже, вибір конкретної полімерної матриці для електропровідного композитного покриття визначається її специфічними властивостями. Крім електропровідності, важливими можуть бути такі аспекти як міцність, хімічна стійкість, вогнестійкість та інші особливості, відповідно до конкретних застосувань.

References

1. Zhang, W., Dehghani-Sanij, A. A., & Blackburn, R. S. (2007). Carbon based conductive polymer composites. *Journal of materials science*, 42, 3408–3418. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-007-1688-5>.
2. Motlatle, A. M., Mofokeng, T. G., Scriba, M. R., Ojijo, V., Ray, S. S. (2021). The effect of electrically conducting carbon materials on the conductivity and morphology of poly (vinyl butyral) and chitosan blend composite for application in anti-corrosive coatings. *Synthetic Metals*, 281, 116914. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0379677921002204>.
3. Mai, V. D., Nguyen, D. C. T., Vu, V. P., Lee, S. H. (2022). Fast healing conductive polymer composite based on carbon black and polyurethane containing disulfide bonds. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 28(1),

Література

1. Zhang W., Dehghani-Sanij A. A., Blackburn R. S. Carbon based conductive polymer composites. *Journal of materials science*. 2007. 42. P. 3408–3418. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-007-1688-5>.
2. Motlatle A. M., Mofokeng T. G., Scriba M. R., Ojijo V., Ray S. S. The effect of electrically conducting carbon materials on the conductivity and morphology of poly (vinyl butyral) and chitosan blend composite for application in anti-corrosive coatings. *Synthetic Metals*. 2021. 281. 116914. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0379677921002204>.
3. Mai V. D., Nguyen D. C. T., Vu V. P., Lee S. H. Fast healing conductive polymer composite based on carbon black and polyurethane containing disulfide bonds. *Journal of Vinyl and*

- 115–124. URL: <https://4spepublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/vnl.21871>.
4. Mattar, H., Baz, Z., Saleh, A., Shalaby, A. S., Azzazy, A. E., Salah, H., Ismail, I. (2020). Nitrocellulose: Structure, synthesis, characterization, and applications. *Water Energy Food Environ. J.* 3, 1–15. URL: <https://www.naturalpublishing.com/files/published/xyw3c32z825c89.pdf>.
5. Crespy, D., Bozonnet, M., Meier, M. (2008). 100 Years of Bakelite, the Material of a 1000 Uses. *Angewandte Chemie International Edition*, 47(18), 3322–3328.
6. Frąckowiak, S., Kozłowski, M. (2010). Polimerowe kompozyty elektroprowadzące jako materiały o potencjale sensorycznym. *Polimery*, 55(5), 390–398.
6. Kumar, N., Jain, P. K., Tandon, P., Pandey, P. M. (2018). Additive manufacturing of flexible electrically conductive polymer composites via CNC-assisted fused layer modeling process. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40, 1–13.
7. Tran, V. V., Lee, S., Lee, D., Le, T. H. (2022). Recent developments and implementations of conductive polymer-based flexible devices in sensing applications. *Polymers*, 14(18), 3730. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/18/3730>.
8. Liu, H., Li, Q., Zhang, S., Yin, R., Liu, X., He, Y., ... Guo, Z. (2018). Electrically conductive polymer composites for smart flexible strain sensors: a critical review. *Journal of Materials Chemistry C*, 6(45), 12121–12141. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/tc/c8tc04079f/unauth>.
9. Lin, J. C., Liatsis, P., Alexandridis, P. (2023). Flexible and stretchable electrically conductive polymer materials for physical sensing applications. *Polymer Reviews*, 63(1), 67–126. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15583724.2022.2059673>.
10. Nyholm, L., Nyström, G., Mihranyan, A., Strømme, M. (2011). Toward flexible polymer and paper-based energy storage devices. *Advanced Materials*, 23(33), 3751–3769. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201004134>.
11. Svistilnik, R. F., Fedoriv, T. R., Savchenko, B. M., Osaulenko, S. I. (2022). Rozrobka tekhnolohiyi elektrprovidnikh gibridnikh kompozitsiynykh pokryttiv [Development technology of electrically conductive hybrid composite coatings]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh* = *Additive Technology*. 2022. 28(1). P. 115–124. URL: <https://4spepublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/vnl.21871>.
4. Mattar H., Baz Z., Saleh A., Shalaby A. S., Azzazy A. E., Salah H., Ismail I. Nitrocellulose: Structure, synthesis, characterization, and applications. *Water Energy Food Environ. J.* 2020. 3. P. 1–15. URL: <https://www.naturalpublishing.com/files/published/xyw3c32z825c89.pdf>.
5. Crespy D., Bozonnet M., Meier M. 100 Years of Bakelite, the Material of a 1000 Uses. *Angewandte Chemie International Edition*. 2008. 47(18). P. 3322–3328.
6. Frąckowiak S., Kozłowski M. Polimerowe kompozyty elektroprowadzące jako materiały o potencjale sensorycznym. *Polimery*. 2010. 55(5). P. 390–398.
6. Kumar N., Jain P. K., Tandon P., Pandey P. M. Additive manufacturing of flexible electrically conductive polymer composites via CNC-assisted fused layer modeling process. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2018. 40. P. 1–13.
7. Tran V. V., Lee S., Lee D., Le T. H. Recent developments and implementations of conductive polymer-based flexible devices in sensing applications. *Polymers*. 2022. 14(18), 3730. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/18/3730>.
8. Liu H., Li Q., Zhang S., Yin R., Liu X., He Y. ... Guo Z. Electrically conductive polymer composites for smart flexible strain sensors: a critical review. *Journal of Materials Chemistry C*. 2018. 6(45). P. 12121–12141. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/tc/c8tc04079f/unauth>.
9. Lin J. C., Liatsis P., Alexandridis P. Flexible and stretchable electrically conductive polymer materials for physical sensing applications. *Polymer Reviews*. 2023. 63(1). P. 67–126. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15583724.2022.2059673>.
10. Nyholm L., Nyström G., Mihranyan A., Strømme M. Toward flexible polymer and paper-based energy storage devices. *Advanced Materials*. 2011. 23(33). P. 3751–3769. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201004134>.
11. Свістільнік Р. Ф., Федорів Т. Р., Савченко Б. М., Осауленко С. І. Розробка технології електропровідних гібридних композиційних покриттів. *Технології та інжиніринг*. 2022.

- Technologies and Engineering, 4(9), 60–70. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/20047> [in Ukrainian].
12. Gutiérrez, M. P., Li, H., Patton, J. (2002). Thin film surface resistivity. *Mate 210 Experimental Methods in Materials Engineering*. 25 p.
- № 4(9). С. 60–70. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/20047>.
12. Gutiérrez M. P., Li H., Patton J. Thin film surface resistivity. *Mate 210 Experimental Methods in Materials Engineering*. 2002. 25 p.

SVISTSILNIK ROMAN

Postgraduate student,
Department of Chemical Technologies and
Resource Saving, Kyiv National University
of Technologies and Design, Ukraine
E-mail: romchigo@gmail.com

FEDORIV TARAS

Postgraduate student,
Department of Chemical Technologies and
Resource Saving, Kyiv National University
of Technologies and Design, Ukraine
E-mail: tfedoriv04@gmail.com

SVISTSILNIK R. F., FEDORIV T. R.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

**INFLUENCE OF POLYMER MATRICES ON THE ELECTRICAL PROPERTIES
OF COMPOSITE COATINGS**

Purpose. This study aims to determine how the polymer matrix affects the electrical properties of composite coatings containing conductive carbon filler.

Methodology. The specific surface and volumetric electrical resistivity of the coatings were measured using a four-electrode cell and the Kelvin method. The dynamic viscosity of the polymer matrix solution was assessed with a VEVOR NDJ-9S rotational viscometer. The dry residue of the composite coating solution was determined by the weight method.

Findings. The study reveals the significant impact of polymer matrices on the electrical properties of composite polymer coatings. Notably, coatings based on nitrocellulose (NC) exhibit the lowest surface and bulk electrical resistance, likely due to the highly polar nitro groups in the NC matrix. Conversely, coatings with a Bakelite resin (BR) matrix show the highest resistance. For coatings combining a polyvinyl butyral (PVB) matrix with 5% and 10% Bakelite resin (BS), lower resistance is observed at 5% BS, with an increase in resistance at 10% BS, compared to coatings solely based on PVB. The selection of a suitable polymer matrix for electrically conductive composite coatings depends on specific properties like strength, chemical resistance, and fire resistance.

Originality. This research uniquely identifies the impact of different polymer matrices on the electrical resistivity of composite coatings.

Practical value. The findings will aid in selecting the appropriate polymer matrix for flexible heating elements, tailored to their specific applications.

Keywords: polyvinyl butyral (PVB); nitrocellulose (NC); polyurethane (PU); Bakelite resin (BR); conductive filler; conductive coatings; carbon black; graphite.