

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.4.5>

УДК 678.679:2

СВІСТІЛЬНИК Р. Ф., ФЕДОРІВ Т. Р.,  
САВЧЕНКО Б. М., ОСАУЛЕНКО С. І.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

## РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ГІБРИДНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ

**Мета дослідження.** Розроблення технології та складу електропровідних полімерних покриттів з регульованим рівнем електричного опору на основі вуглецевих складових для застосування при створенні гнучких нагрівальних елементів.

**Методи дослідження:** Визначали питомий поверхневий та об'ємний електричний опори за методом Кельвіна використовуючи чотириелектродну схему.

**Результати.** Електричний опір покриття в значній мірі залежить від способу його нанесення та виду субстрату, що застосовується. Роликівий аплікатор забезпечує отримання монолітного багатошарового покриття з низьким значенням питомого об'ємного електричного опору. Паперовий субстрат дозволяє сформувати бездефектне покриття завдяки швидкому поглинанню розчинника та попередженню розширення системи через зростання її в'язкості. Проте плівковий субстрат є більш придатним у випадку створення нагрівальних елементів. Товщина покриття впливає на значення питомого об'ємного електричного опору і дозволяє керовано регулювати його електропровідність. Найнижчі значення електричного опору для створених покриттів отримані у випадку використання електропровідної сажі марки ХС 72 в кількості 10–20% мас. Введення інертних наповнювачів у склад композиції дозволяє знизити горючість покриття та покращити електропровідність за рахунок зменшення частки діелектричної полімерної матриці та покращення перколяції. Модифікація полімерної матриці реактопластичним компонентом – бакелітовою смолою забезпечує отримання термостабільного покриття, стійкого до дії розчинників.

**Наукова новизна.** Встановлено залежність питомого електричного опору покриття від вмісту та виду сажі. Показано можливість регулювати електропровідність покриття шляхом введення інертного мінерального наповнювача в склад композиції.

**Практична значимість.** Встановлено вплив технології нанесення покриття на значення його електричного опору. Визначена залежність питомого електричного опору покриття від виду субстрату.

**Ключові слова:** полівінілбутираль; електропровідний наповнювач; електропровідні покриття; сажа; графіт; антипірен.

**Вступ.** Композитні покриття з електричними властивостями широко застосовуються в сучасній техніці – це і створення нагрівальних елементів, поводження зі статичною електрикою, радіоекранування, і т.д. На відміну від електричних композитних матеріалів покриття мають ряд переваг, зокрема, надання певним об'єктам електропровідних властивостей більш економічно доцільно через нанесення електричного покриття, ніж створення електропровідної матриці.

Призначення електропровідних покриттів – забезпечити проходження електричного струму або відведення з поверхні статичної електрики. Електропровідними вважаються покриття, які мають питомий електричний опір, менше за  $10^5$  Ом•м. Підвищена електрична провідність покриттів досягається: 1) застосуванням плівкоутворювачів з великою електронною (напівпровідники) або іонною (поліелектроліти) провідністю; 2) використанням електропровідних наповнювачів; 3) введенням до складу покриттів або обробкою їхньої поверхні поверхнево-активними речовинами.

Для подальших досліджень було обрано варіант з використанням електропровідних наповнювачів, оскільки в такий спосіб можна варіювати в широких межах властивості кінцевих виробів. Електрична провідність таких наповнених покриттів визначається в основному складом та електричними параметрами окремих компонентів, а також залежить від

якості змішування компонентів, їх попередньої обробки, а також від об'ємної частки провідного наповнювача та його електропровідності. Якщо дрібні частинки наповнювача розташовані на великих відстанях один від одного, то провідність всього композиту обмежується електропровідністю полімерної матриці (залежно від вибору матеріалу матриці) [1]. Збільшення кількості частинок наповнювача зменшує відстані між центрами цих частинок до досягнення певного критичного значення, при якому досягається різке збільшення електропровідності. Це критичне значення називається порогом перколяції – відсотком наповнювача, вище якого в композитній матриці утворюються безперервні провідні ділянки. При невеликих відмінностях вмісту наповнювача електропровідність може змінюватися на кілька порядків. Лише коли його вміст досить великий, численні провідні області утворюють тривимірну мережу. Тоді подальше збільшення об'єму наповнювача не викликає істотних змін електропровідності [2].

Аналіз літературних джерел в даному напрямку дозволив визначити основні полімерні матриці та види наповнювачів, що застосовуються для цих цілей [3]. Так автори робіт [4] для створення струмопровідних композитів застосовували полярні полімери – полівінілхлорид і фторполімери та неполярний надвисокомолекулярний поліетилен. Електропровідність композитів на основі полярних полімерних матриць була вищою, ніж для композитів з неполярною матрицею. Також для електропровідних композицій застосовували полілактид [5], поліетилен та поліпропілен [6], акрилонітрил-бутадієнстирол пластик [7], поліамід [8], поліуретан [9].

Як струмопровідні наповнювачі застосовують сажу, графіт, вуглецеві волокна, металічні порошки, вуглецеві нанотрубки, графен, тощо, а також їх поєднання [10].

**Постановка завдання.** Створення композитних полімерних покриттів з високими електричними характеристиками з доступних дешевих компонентів та покриттів з максимальними електричними властивостями забезпечить вирішення ряду питань в галузі створення гнучких нагрівальних елементів, поводження зі статичною електрикою, та ін. Метою даної роботи було розроблення технології та складу електропровідних полімерних покриттів з регульованим рівнем електричного опору на основі вуглецевих складових для застосування при створенні гнучких нагрівальних елементів.

**Вихідні матеріали та методи.** Для досліджень було використано ряд електропровідних наповнювачів – колоїдний графітовий препарат марки С-0 (ТОВ «Завалівський графіт»), сажу марок Black Pearls® 2000 Cabot, Vulcan XC 72 Cabot Corporation та вітчизняну марку N330, мінеральний наповнювач карбонат кальцію марки Оmya AG Omyafiber 800, антипіренний доданок – декабромдифенілетан. Полімерною матрицею було обрано полівінілбутираль (ПВБ) марки SDW-3A та бакелітову смолу (БС) (фенол формальдегідна смола резольного типу).

Як допоміжні речовини при отриманні покриттів застосовували ізопропіловий спирт технічний. Рецептурний склад досліджуваних композицій наведено в таблиці 1.

Для приготування композицій було використано лабораторне устаткування – млин тривалковий марки Exact 35, верхньопривідний змішувач марки ІКА RW20 (діаметр дисольверної мішалки – 50 мм). Технологія отримання електропровідного полімерного покриття передбачає кілька стадій (рис. 1).

Спочатку проводилось змішування порошкоподібних наповнювачів з ізопропіловим спиртом на дисольвері 41 протягом 20 хв та їх перетирання на тривалковому млині 7 – на мінімальному проміжку між валами при трикратному пропускання через вали до утворення однорідної пасту. Далі отриману пасту вводили за допомогою дисольверу 43 в попередньо приготований розчин ПВБ у ізопропіловому спирті (з використанням дисольверу 42 при швидкості обертання мішалки 300 об/хв протягом 6 год). Тривалість перемішування пасту з розчином ПВБ – 1 год, швидкість обертання мішалки – 800 об/хв. Отриману суміш контролювали за вмістом сухого залишку для забезпечення витримки заданих пропорцій

компонентів. Сухий залишок у фарбі 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.

Таблиця 1

**Рецептурний склад досліджуваних полімерних композицій**

Номер композиції	Вміст компонентів, % мас.							
	Полімерна матриця		Графіт	Сажа ВР 2000	Сажа ХС 72	Сажа N330	Карбонат кальцію	Декабром-дифенілетан
	ПВБ	БС						
2	30	-	60	10	-	-	-	-
3	30	-	55	15	-	-	-	-
4	30	-	50	20	-	-	-	-
6	30	-	60	-	10	-	-	-
7	30	-	55	-	15	-	-	-
8	30	-	50	-	20	-	-	-
9	20	-	60	10	-	-	10	-
10	30	-	50	10	-	-	10	-
11	30	-	55	10	-	-	5	-
12	25	-	60	10	-	-	5	-
13	20	-	55	10	-	-	-	15
14	20	-	50	10	-	-	-	20
15	20	-	45	10	-	-	-	25
18	15	5	40	10	-	-	10	20
19	20	-	40	10	-	-	10	20
20	20	-	60	10	-	-	-	10
21	30	-	60	-	-	10	-	-
22	30	-	55	-	-	15	-	-
23	30	-	50	-	-	20	-	-
24	30	-	70	-	-	-	-	-

Отриману однорідну суміш наносили на субстрат з біаксіально орієнтованої ПЕТ плівки за допомогою щільного ракульного аплікатору задаючи товщину 50, 75 та 100 мкм. Швидкість переміщення аплікатору на поверхні плівки утримувалась сталою і складала 100мм/хв. Після аплікування покриття висушували протягом 24 год на повітрі. Також як субстрат було використано папір – ватман зі щільність 170г/м<sup>2</sup>, на який наносили покриття роликвим аплікатором роблячи 5–7 проходів роликком.

Вимірювання поверхневого та об'ємного електричного опорів здійснювали за 4-х електродною схемою – методом Кельвіна. 4-провідний метод вимірювання опору – це дуже точний метод вимірювання, який дозволяє вимірювати дуже низький опір із високою точністю. Він використовується для запобігання проблемам з контактним опором або опором вивідного дроту ланцюга [11]. У 4-провідному методі вимірювання опору використовується чотирьохпровідне з'єднання, де двопровідне з'єднання використовується для подачі струму на вимірювальний компонент, а інше двопровідне з'єднання використовується для вимірювання падіння напруги на вимірювальному елементі (рис. 2).

Такий спосіб вимірювання дозволяє визначити об'ємний питомий електричний опір саме покриттів. Питомий поверхневий електричний опір покриття при лінійному розміщенні електродів визначали за формулою [11]:

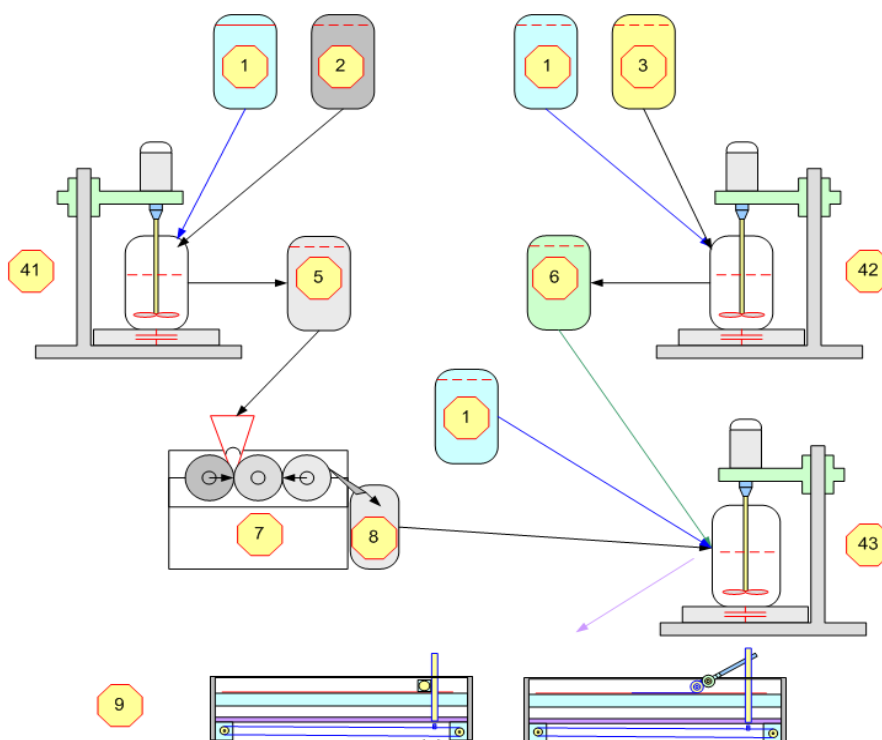
$$\rho_s = \frac{\pi}{\ln 2} D \frac{U}{I} = 4.53 \cdot D \frac{U}{I}, \quad (1)$$

де  $\rho_s$  – питомий поверхневий електричний опір Ом·см;

$D$  – коефіцієнт корекції форми зразка і розміщення зонду під час вимірювання;

$U$  – різниця електричних потенціалів (напруга) на кінцях зразка, В;

$I$  – сила струму, що протікає між кінцями зразка під дією різниці потенціалів, А.



Почначення: 1 – розчинник; 2 – наповнювач; 3 – полімерна основа; 41 – дисольвер для отримання суміші наповнювач/розчинник; 42 – дисольвер для отримання розчину полімерної основи; 5 – суміш наповнювач/розчинник; 6 – розчин полімерної основи; 7 – тривалковий млин; 8 – суміш наповнювача і розчинника, перетерта до стану пасти; 43 – дисольвер для отримання фарби, придатної до нанесення на субстрат; 9 – аплікатор для нанесення покриття.

Рис. 1. Технологія отримання електропровідного полімерного покриття

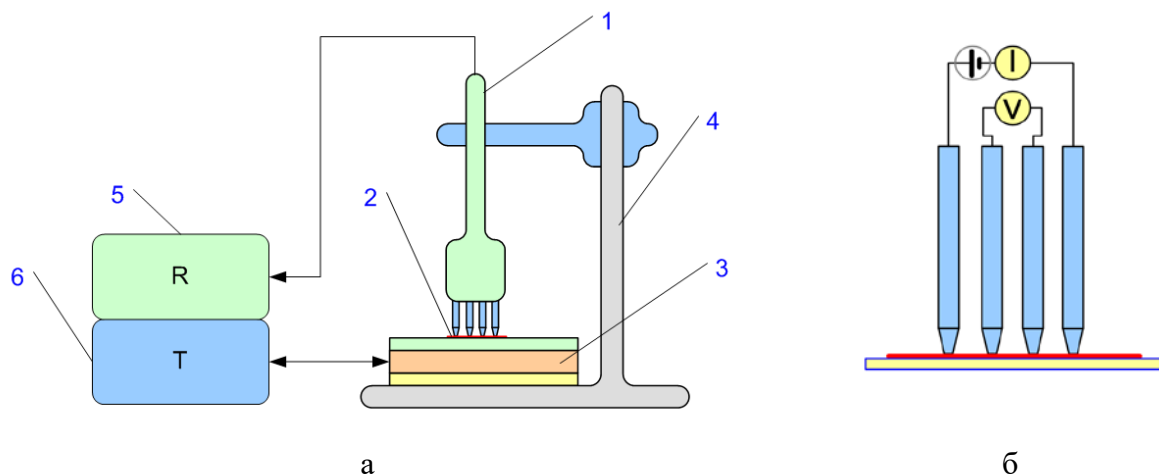


Рис. 2. Схема вимірювання питомого електричного опору (а) з використанням 4-х електродної комірки (б)

Питомий об'ємний електричний опір покриття визначали за формулою [11]:

$$\rho = \rho_s \cdot H, \quad (2)$$

де  $H$  – товщина зразка, м.

**Результати досліджень.** На першому етапі роботи було досліджено вплив технології нанесення покриття на його електричний опір.

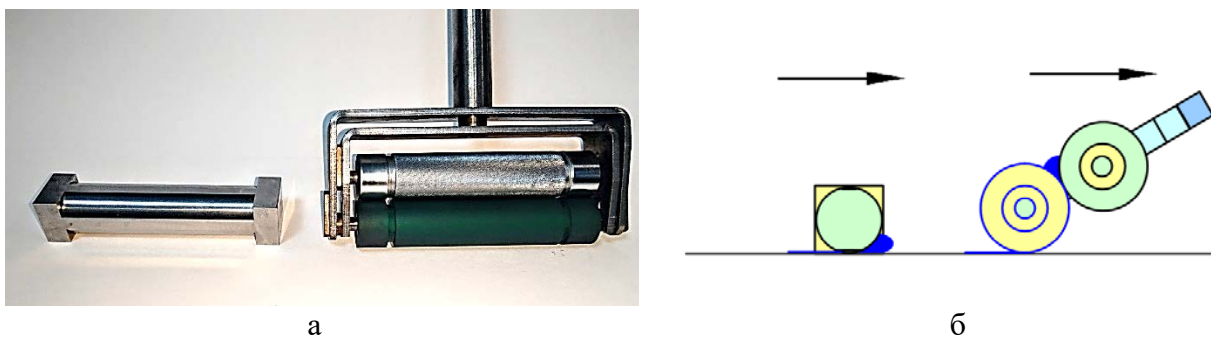


Рис. 3. Аплікатори для нанесення покриття: а – зовнішній вигляд: ліворуч – щілинний ракельний, праворуч – роликівий; б – схема формування шару щілинним ракельним (ліворуч) та роликівим (праворуч) аплікаторами

Для створення покриттів використовувались два способи нанесення різними типами пристроїв: щілинний ракельний та роликівий аплікатори (рис. 3). Обидва види аплікаторів широко використовуються в технологіях створення покриттів – ракельний – для більш в'язких систем, роликівий – для систем з низькою в'язкістю. Роликівий аплікатор є моделлю флексографічного способу друку. Ракельний використовується в технологіях каширування. Ракельний аплікатор дозволяє наносити певну, часто значну, товщину за 1 прохід і при цьому чинить мінімальний тиск на фарбу, яка наноситься. Роликівий аплікатор за один прохід дозволяє нанести невелику товщину покриття, при цьому задається орієнтація частинок системи в напрямку нанесення і створюється певний тиск на фарбу, сформоване покриття ущільнюється в результаті формування. Таким чином, кожна з технологій дозволяє нанести різну кількість фарби на одиницю площі субстрату, і отримати покриття з різною товщиною. Електричний опір також в значній мірі залежить від технології створення покриття (табл. 2, композиція 18) та його товщини. При збільшенні товщини покриття відбувається зниження його електричного опору не залежно від технології нанесення, що пов'язано зі збільшенням частки електропровідного компонента в одиниці об'єму дослідного зразка (табл. 2, композиція 6).

Ще один фактор, що впливає на значення електричного опору досліджуваного покриття, це вид субстрату.

Для досліджень використовувались два види субстрату – біаксіально орієнтована ПЕТ плівка, товщиною 150 мкм та папір – ватман, товщиною 240 мкм. При нанесенні фарби на паперову основу розчинник поглинається папером і система швидко стає в'язкою, що запобігає седиментації частинок фарби та її розшаруванню. У випадку плівки – розчинник тільки випаровується і система тривалий час залишається низьков'язкою, що призводить до розшарування, особливо на високосажонаповнених композиціях. В результаті покриття на паперовій основі на порядок-два мають нижчий електричний опір (табл. 2, композиції 4, 8). Проте папір не можна розглядати як варіант субстрату, при створенні нагрівачів, лише як проміжний етап у наукових цілях при розробці складу покриття.

Таблиця 2

**Питомий поверхневий та об'ємний електричний опір досліджуваних композицій**

Номер композиції	Технологія нанесення	Вид субстрату	Товщина, мкм	Опір, Ом	Питомий поверхневий електричний опір, Ом	Питомий об'ємний електричний опір, Ом•см
18	ракельний	плівка	30–40	336,00	1514,00	1,34
	роликовий	плівка	30–40	55,80	251,00	0,28
		папір	100–150	11,10	49,90	0,19
6	ракельний	плівка	20	329,00	1485,00	2,97
			25	265,00	1194,00	2,99
			30	163,30	735,00	2,21
	роликовий	папір	50	14,50	65,30	0,07
			75	9,60	43,20	0,07
			140	5,90	26,50	0,08
4	ракельний	плівка	30–40	214,60	962,00	2,89
	роликовий	папір	100–150	9,00	40,60	0,06
8	ракельний	плівка	30–40	37,30	168,30	0,50
	роликовий	папір	100–150	2,00	8,90	0,03

Електропровідність покриття в значній мірі визначається складом композиції та співвідношенням її компонентів. Тому наступним етапом роботи було дослідження впливу виду сажі та її кількості на зміну електричного опору покриття (табл. 3, композиції 2–4, 6–8, 21–24).

Таблиця 3

**Питомий поверхневий та об'ємний електричний опір досліджуваних композицій**

Номер композиції	Технологія нанесення	Вид субстрату	Товщина, мкм	Опір, Ом	Питомий поверхневий електричний опір, Ом	Питомий об'ємний електричний опір, Ом•см
2	роликовий	папір	100–150	21,50	97,40	0,22
3				4,30	19,50	0,07
4				9,00	40,60	0,06
6				5,90	26,50	0,08
7				3,00	13,70	0,04
8				2,00	8,90	0,03
21				21,30	95,60	0,28
22				11,60	52,50	0,15
23				6,60	29,30	0,09
24				58,20	262,00	0,58

Для досліджень використано сучасні промислові марки електропровідних ацетиленових саж, що містять іони металів та відрізняються питомою поверхнею. Сажа ВР2000 володіє вищою питомою поверхнею і за вартістю дорожча від ХС 72 майже в 2,5 рази. Також для досліджень використано вітчизняну марку газової сажі N330, яка має значно нижчу ціну. Для створення покриття з композицій зі всіма видами сажі використовували роликовий аплікатор, яким наносили на паперовий субстрат покриття товщиною 100–150 мкм. Аналіз отриманих значень електричного опору показує, що вітчизняна сажа марки N330 дозволяє

отримувати покриття з питомим поверхневим електричним опором на рівні з сажею ВР2000, а при 20% мас навіть на 30% нижчим значенням електричного опору. Хоча питомий об'ємний електричний опір для композицій з вітчизняною сажею має вищі значення, що зумовлено високою питомою поверхнею сажі ВР2000. Для сажі марки ХС 72 спостерігаються найнижчі значення питомих електричних опорів. Крім того, при збільшенні вмісту сажі ХС 72 в композиції з 10% мас до 20% мас. значення питомого об'ємного електричного опору знижується в 2,8 рази, для сажі ВР2000 – в 3,4 рази, а для сажі N330 – в 3 раз.

Якщо порівнювати з композицією, яка містить тільки графіт, то введення 10% мас. навіть сажі марки N330 дозволяє знизити електричний опір практично в 2 рази за рахунок розміщення частинок сажі між торцями частинок графіту та збільшення зони контакту між електропровідними частинками.

Створювані покриття передбачається використовувати для виготовлення плівкових нагрівачів. В цьому випадку важливим показником є горючість тому, наступний етап досліджень присвячений розробці технологій зниження горючості покриттів. Було використано пасивний та активний способи зниження горючості покриттів. Пасивний спосіб передбачає введення в склад композиції інертного мінерального наповнювача на основі обробленого карбонату кальцію природного походження в кількості 5–10% мас. Введення наповнювача дозволяє зменшити частку полімерної матриці в системі, концентрувати частинки сажі та графіту навколо частинок наповнювача, і тим самим заповнити простір в композиції, так званим, інертним носієм струмопровідного наповнювача. Отримані результати питомого опору досліджуваних композицій (табл. 4, композиції 9–10) підтвердили висловлене припущення, зокрема, при заміщенні 10% мас. карбонату кальцію частини ПВБ (композиція 9) питомий об'ємний електричний опір зменшується в 4 рази порівняно з композицією 2 при товщині покриття 100–150 мкм. Заміщення інертним наповнювачем частини полімерної матриці викликає зниження електричного опору композиції, а заміщення електропровідного наповнювача графіту – до зростання опору, що ймовірно пов'язано з ускладненням перколяції в наслідок збільшення вмісту діелектричних складових композиції. Аналогічна залежність прослідковується при заміщенні частини полімерної матриці на 10% мас. дакебромдифенілетану (композиція 20).

Активний спосіб зниження горючості покриття передбачає введення в склад композиції 10–25% мас. антипірену – дакебромдифенілетану – добавки, яка знижує горючість шляхом свого розкладання та виділення продуктів, що не підтримують горіння. Крім того, антипірен є високополярною органічною сполукою, що може бути джерелом іонів і дозволяє реалізувати в композиції поєднання двох видів провідності – перколяційної та іонної (табл. 4, композиції 13–15). Найнижче значення електричного опору спостерігається при 20% мас. антипірену.

Введення бакелітової смоли в склад полімерної матриці в кількості 5% мас. дозволяє отримувати стійкі покриття за рахунок термічного структурування бакелітової смоли після термообробки при 110°C. (табл. 4, композиція 18). Структуроване покриття володіє зниженою розчинністю та підвищеною термічною стабільністю. Питомий об'ємний електричний опір для зразків на плівковому субстраті знижується після структурування полімерної матриці.

Досліджені композиції володіють рівнем електричного опору, придатним для виготовлення плівкових нагрівальних елементів. Дослідження температурної залежності електричного опору будуть розглянуті в наступних дослідженнях та дозволять обрати оптимальний склад композиції для створення нагрівальних елементів зі специфічним рівнем потужності.

**Висновки.** Електричний опір покриття суттєво знижується зі зростанням його товщини, що пов'язано з утворенням стійкої та стабільної просторової перколяційної структури. Просторова перколяційна структура в розгуляному випадку створюється за

рахунок агрегатів графіту та досить великих частинок наповнювачів, розмір яких співрозмірний з товщиною покриття 30–40 мкм.

Таблиця 4

**Питомий поверхневий та об'ємний електричний опір досліджуваних композицій**

Номер композиції	Технологія нанесення	Вид субстрату	Товщина, мкм	Опір, кОм	Питомий поверхневий електричний опір, кОм	Питомий об'ємний електричний опір, Ом•см
2	роликовий	папір	100–150	21,50	97,40	0,22
9	ракельний	плівка	30–40	69,60	313,00	1,25
	роликовий	папір	100–150	4,50	20,30	0,06
10	ракельний	плівка	30–40	630,00	2830,00	11,32
13	ракельний	плівка	30–40	285,00	1286,00	5,14
14	ракельний	плівка	30–40	236,00	1067,00	3,73
	роликовий	папір	125	9,80	44,20	0,12
15	ракельний	плівка	30–40	419,00	1887,00	5,66
18	ракельний	плівка	30–40	336,00	1514,00	1,34
		плівка	50	55,80	251,00	0,28
	роликовий	папір	100–150	11,00	49,30	0,20
18*	роликовий	плівка	50	44,90	202,30	0,22
		папір	100–150	11,10	49,90	0,20
19	роликовий	плівка	100–150	18,00	81,50	0,18
		папір	100–150	15,10	67,80	0,15
20	роликовий	папір	100–150	4,30	19,50	0,06

\* термообробка 110°C, протягом 30 хв

Поєднання графіту і сажі дозволяє отримати синергічний ефект, і створити покриття, що мають нижче значення електричного опору порівняно з композицією, яка містить тільки моно наповнювач.

Нанесення покриттів за допомогою щілинного ракельного та роликового аплікаторів суттєво впливає на значення електричного опору досліджуваних зразків. Нанесення електропровідного покриття одним монолітним шаром щілинний ракельним аплікатором призводить до розшарування, розділення складових системи внаслідок високого часу випаровування розчинника. Формування покриття з багатьох тонких шарів за допомогою роликового аплікатору дозволяє отримати покриття з нижчими значення електричного опору.

Великий вплив на величину електричного опору покриття має вид субстрату. Плівковий субстрат володіє поверхнею з низькою розгалуженістю та не поглинає розчинник. Час, необхідний для випаровування розчинника, є достатнім для розділення компонентів суміші. Паперовий субстрат здатен швидко поглинати розчинник та стабілізувати систему шляхом різкого зростання в'язкості, що дозволяє отримати покриття з низьким електричним опором. Введення наповнювачів для зниження горючості покриття в межах 10–20% мас. дозволяє зменшити вміст горючої полімерної матриці в композиції та понизити рівень електричного опору. Введення в склад полімерної матриці бакелітової смоли забезпечує отримання покриттів, придатних до термічного структурування, що покращує їх стабільність і стійкість до дії розчинників. Покриття після термічного структурування володіють нижчим значенням електричного опору порівняно з неструктурованими.



## References

1. Myalski, J., Wieczorek, J. (2009). Właściwości kompozytów polimerowych zawierających cząstki srebra. *Kompozyty*, № 9 (2), P. 175–180.
2. Pal, R. (2007). On the Electrical Conductivity of Particulate Composites. *J Compos Materials*. <https://doi.org/10.1177/0021998307076489>.
3. Augustyn, P., Rytlewski, P., Moraczewski, K. et al. (2021). A review on the direct electroplating of polymeric materials. *J Mater Sci.*, № 56, P. 14881–14899. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06246-w>.
4. Shiyanova, K., Gudkov, M., Gorenberg, A., Melnikov, V. (2020). Segregated Network Polymer Composites with High Electrical Conductivity and Well Mechanical Properties based on PVC, P(VDF-TFE), UHMWPE, and rGO. *ACS Omega*, № 5 (39), P. 25148–25155. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02859>.
5. Pietrzak, Ł., Jeszka, J. (2010). Nanokompozyty polilaktyd/wielościennie nanorurki węglowe – otrzymywanie i właściwości elektryczne. *Polimery*, № 55, P. 7–8.
6. Frąckowiak, S., Kozłowski, M. (2010). Polimerowe kompozyty elektroprowadzące jako materiały o potencjale sensorycznym. *Polimery*, № 55, P. 5.
7. Naguchi, H., Kakagawa, T. (2000). Development of high conductivity plastic using short copper fiber. *Seikei-Kakou*, № 12 (2), P. 111–114.
8. Gardiner, F. L., Carter, E. J. (2009). Polymer Electronics – A Flexible Technology. In: *Highly Conductive Plastics-Custom-formulated Functional Materials for Injection Mouldable Electronic Applications*. Eds. W. Michaeli, T. Pfefferkorn, J. Fragner. Smithers Rapra Technology, Shawbury. P. 43–56.
9. Dupenne, D., Lonjon, A., Dantras, E., Pierré, T., Lubineau, M., Lacabanne, C. (2021). Carbon fiber reinforced polymer metallization via a conductive silver nanowires polyurethane coating for electromagnetic shielding. *J Appl Polym Sci*. <https://doi.org/10.1002/app.50146>.
10. Kuryptya, Y., Savchenko, B., Sliptsov, A., Plavan, V., Sova, N. (2016). Design of electrically conducting polymer hybrid composites based on polyvinyl chloride and polyethylene. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* [this link is disabled](#), No. 3 (6-81), P. 26–32.

## Література

1. Myalski J., Wieczorek J. Właściwości kompozytów polimerowych zawierających cząstki srebra. *Kompozyty*. 2009. № 9 (2). P. 175–180.
2. Pal R. On the Electrical Conductivity of Particulate Composites. *J Compos Materials*. 2007. <https://doi.org/10.1177/0021998307076489>.
3. Augustyn P., Rytlewski P., Moraczewski K. et al. A review on the direct electroplating of polymeric materials. *J Mater Sci*. 2021. № 56, P. 14881–14899. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06246-w>.
4. Shiyanova K., Gudkov M., Gorenberg A., Melnikov V. Segregated Network Polymer Composites with High Electrical Conductivity and Well Mechanical Properties based on PVC, P(VDF-TFE), UHMWPE, and rGO. *ACS Omega*. 2020. № 5 (39). P. 25148–25155. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02859>.
5. Pietrzak Ł., Jeszka J. Nanokompozyty polilaktyd/wielościennie nanorurki węglowe – otrzymywanie i właściwości elektryczne. *Polimery*. 2010. № 55. P. 7–8.
6. Frąckowiak S., Kozłowski M. Polimerowe kompozyty elektroprowadzące jako materiały o potencjale sensorycznym. *Polimery*. 2010. № 55. P. 5.
7. Naguchi H., Kakagawa T. Development of high conductivity plastic using short copper fiber. *Seikei-Kakou*. 2000. № 12 (2). P. 111–114.
8. Gardiner F. L., Carter E. J. Polymer Electronics – A Flexible Technology. In: *Highly Conductive Plastics-Custom-formulated Functional Materials for Injection Mouldable Electronic Applications*. Eds. W. Michaeli, T. Pfefferkorn, J. Fragner. Smithers Rapra Technology, Shawbury, 2009. P. 43–56.
9. Dupenne D., Lonjon A., Dantras E., Pierré T., Lubineau M., Lacabanne C. Carbon fiber reinforced polymer metallization via a conductive silver nanowires polyurethane coating for electromagnetic shielding. *J Appl Polym Sci*. 2021. <https://doi.org/10.1002/app.50146>.
10. Kuryptya Y., Savchenko B., Sliptsov A., Plavan V., Sova N. Design of electrically conducting polymer hybrid composites based on polyvinyl chloride and polyethylene. *Eastern-European Journal of Enterprise*

11. Heaney, M. B. (2003). Electrical Conductivity and Resistivity. In: *Electrical Measurement, Signal Processing, and Displays*. Ed. John G. Webster. CRC Press.

Technologies this link is disabled. 2016. No. 3 (6-81). P. 26–32.

11. Heaney M. B. Electrical Conductivity and Resistivity. In: *Electrical Measurement, Signal Processing, and Displays*. Ed. John G. Webster. CRC Press, 2003.

**SVISTSILNIK ROMAN**

Postgraduate student,  
Department of Applied Ecology, Technology  
of Polymers and Chemical Fibers,  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
E-mail: djanc@ukr.net

**FEDORIV TARAS**

Postgraduate student,  
Department of Applied Ecology, Technology  
of Polymers and Chemical Fibers,  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
E-mail: djanc@ukr.net

**SAVCHENKO BOHDAN**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of  
the Department of Applied Ecology, technology of  
polymers and chemical fibers, Kyiv National University  
of Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-8636-5734>  
Scopus Author ID: 56685269800  
E-mail: [1079@ukr.net](mailto:1079@ukr.net)

**OSAULENKO SERHII**

Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine

**СВИСТИЛЬНИК Р. Ф., ФЕДОРОВ Т. Р., САВЧЕНКО Б. М., ОСАУЛЕНКО С. И.**

Киевский национальный университет технологий и дизайна, Украина

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ  
ГИБРИДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ**

**Цель исследования.** Разработка технологии и состава электропроводных полимерных покрытий с регулируемым уровнем электрического сопротивления на основе углеродистых составляющих для применения при создании гибких нагревательных элементов.

**Методы исследования:** Определяли удельный поверхностный и объемный электрический опоры по методу Кельвина, используя четырехэлектродную схему.

**Результаты.** Электрическое сопротивление покрытия в значительной степени зависит от способа его нанесения и применяемого вида субстрата. Роликовый аппликатор обеспечивает получение монолитного многослойного покрытия с низким значением удельного объемного электрического сопротивления. Бумажный субстрат позволяет сформировать бездефектное покрытие благодаря быстрому поглощению растворителя и предотвращению расслоения системы из-за роста ее вязкости. Однако пленочный субстрат более пригоден в случае создания нагревательных элементов. Толщина покрытия влияет на значение удельного объемного электрического сопротивления и позволяет управляемо регулировать его электропроводность. Самые низкие значения электрического сопротивления для созданных покрытий получены в случае использования электропроводной сажи марки ХС 72 в количестве 10–20% масс. Введение инертных наполнителей в состав композиции позволяет снизить горючесть покрытия и улучшить электропроводность за счет уменьшения частицы диэлектрической полимерной матрицы и улучшения перколяции. Модификация полимерной матрицы реактопластическим компонентом – бакелитовой смолой обеспечивает получение термостабильного покрытия, устойчивого к воздействию растворителей.

**Научная новизна.** Установлена зависимость удельного электрического сопротивления от содержания и вида сажи. Показана возможность регулирования электропроводности покрытия путем введения инертного минерального наполнителя в состав композиции.

**Практическая значимость.** Установлено влияние технологии нанесения покрытия на значение его электрического сопротивления. Определена зависимость удельного сопротивления электрического покрытия от вида субстрата.

**Ключевые слова:** поливинилбутираль; электропроводящий наполнитель; электропроводное покрытие; сажа; графит; антипирен.

**SVISTSILNIK R. F., FEDORIV T. R., SAVCHENKO B. M., OSAULENKO S. I.**

*Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine*

### **DEVELOPMENT TECHNOLOGY OF ELECTRICALLY CONDUCTIVE HYBRID COMPOSITE COATINGS**

**Purpose.** Development of the technology and composition of electrically conductive polymer coatings with an adjustable electrical resistance level based on carbon based conductive components for their use in the creation of flexible heating elements.

**Methodology.** Specific surface and volume electrical resistances were determined by the Kelvin method using a four-electrode probe.

**Findings.** The electrical resistance of the coating largely depends on the method of its application on substrate and the type of substrate used. The roller applicator provides a monolithic multi-layer coating with a low specific volume electrical resistance. The paper substrate allows to form a defect-free coating due to the rapid absorption of the solvent and the prevention of delamination of the system due to the increase in its viscosity. However, the film substrate is more technological in the case of creating film heating elements. The thickness of the coating affects the value of the specific volumetric electrical resistance and allows to control its electrical resistance. The lowest values of electrical resistance for the created coatings were obtained in the case of the use of electrically conductive carbon black grade XC 72 in the amount of 10–20% by mass. The introduction of inert fillers into the composition allows to reduce the flammability of the coating and improve electrical conductivity by reducing the proportion of the dielectric polymer matrix and increasing percolation. Modification of the polymer matrix with a thermoset component – bakelite resin ensures obtaining a thermostable coating resistant to the action of solvents.

**Originality.** The dependence of the specific electrical resistance of the coating on the content and type of carbon black was established. It is shown that it is possible to regulate the electrical resistance of the coating by introducing an inert mineral filler into the composition.

**Practical value.** The impact of the coating technology on the value of its electrical resistance has been established. The dependence of the specific electrical resistance of the coating on the type of substrate is determined.

**Keywords:** polyvinyl butyral; conductive filler; conductive coatings; carbon black; graphite; flame retardant.