

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
ДИЗАЙНУ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Свістільнік Роман Федорович

УДК 621.763-036.7:[621.3.011.2:621.78.012

ДИСЕРТАЦІЯ
РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ
КОМПОЗИТНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ДЖЕРЕЛ ТЕПЛА ТЕХНІЧНОГО
ПРИЗНАЧЕННЯ

161 хімічні технології та інженерія

16 – хімічна та біоінженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


Р.Ф. Свістільнік

Науковий керівник **Савченко Богдан Михайлович**, доктор технічних наук, професор

Київ – 2024

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	6
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА.....	14
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	16
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ В ГАЛУЗІ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ.....	23
1.1 Електропровідні полімерні композити	23
1.2 Сучасні моделі електропровідності полімерних композитних матеріалів	25
1.3 Застосування електропровідних полімерних композитів.....	42
1.4 Типи та загальні характеристики нагрівальних елементів.....	43
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	64
2.1 Характеристики вихідних матеріалів	64
2.1.1 Полімерні зв'язуючі.....	64
2.1.2 Електропровідні наповнювачі	69
2.1.3 Допоміжні речовини та матеріали	75
2.2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	78
2.2.2 Методи контролю рідкого композитного матеріалу.....	84
2.2.3 Методи аплікації покриттів	87
2.2.4 Методика формування плівкового нагрівача.....	88
2.2.5 Визначення питомого об'ємного та поверхневого електричного опору	89
2.2.6 Визначення температурної залежності опору	94

2.2.7 Вимірювання вольт-амперних характеристик композитних електропровідних покриттів	95
---	----

2.2.8 Статистична обробка даних та точність вимірювання	97
---	----

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ЗМІШУВАННЯ ТА СТВОРЕННЯ КОМПОЗИТНИХ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ПОЛІМЕРНИХ ПОКРИТТІВ 99

3.1 Дослідження технології одержання електропровідних покриттів	99
---	----

3.1.1 Дослідження технології сумісного змішування складових композитних електропровідних покриттів.....	100
---	-----

3.1.2 Дослідження роздільного змішування складових композитних електропровідних покриттів	108
---	-----

3.1.3 Дослідження технології послідовного змішування полімерної матриці та диспергованого електропровідного наповнювача	117
---	-----

3.2 Дослідження технології аплікації електропровідних композитних покриттів.....	122
--	-----

3.2.1 Дослідження анізотропії властивостей композитних електропровідних покриттів	125
---	-----

3.2.2 Дослідження впливу субстратів на властивості композитних електропровідних покриттів	131
---	-----

3.2.3 Методи нанесення адаптовані до фізичних властивостей фарби і субстратів	135
---	-----

3.2.4 Оцінка адгезії композитних електропровідних покриттів до субстрату	140
--	-----

3.3 Дослідження впливу складу композитного покриття на електричні властивості.....	143
--	-----

3.3.1 Дослідження залежності питомого поверхневого опору від концентрації наповнювача	144
---	-----

3.3.2 Дослідження електричних властивостей композитних покриттів	154
3.3.3 Дослідження впливу полімерного зв'язуючого на властивості композитних електропровідних покриттів.....	169
3.3.4 Дослідження впливу поверхнево активних речовин на електричні властивості композитних електропровідних покриттів	175
3.4 Дослідження впливу допоміжних наповнювачів на електричні властивості композитних електропровідних покриттів	179
РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТНИХ ПОКРИТТІВ ТА СТВОРЕННЯ НАГРІВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ЇХ ОСНОВІ	
	196
4.1 Залежність електричного опору від температури композитного електропровідного покриття.....	196
4.2 Дослідження вольт-амперних характеристик композитних електропровідних покриттів	204
4.3 Технологія створення нагрівальних елементів з електропровідних полімерних композитних покриттів	214
РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	
	230
5.1 Технологія одержання нагрівальних елементів	230
5.1.1 Технологія одержання гнучких нагрівальних елементів з електропровідних полімерних композитних покриттів	230
5.1.2 Технологія одержання жорстких нагрівальних елементів з електропровідних полімерних покриттів	238
5.2 Застосування композитного покриття для макетів військової техніки	244
5.2.1 Застосування композитних покриттів для створення мета структури	248

5.2.2 Використання електропровідних композитних покриттів для створення гальванічних покриттів	255
5.2.3 Використання електропровідних композитних покриттів для створення нетканих матеріалів	258
ВИСНОВКИ	262
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	264
ДОДАТКИ.....	300

АНОТАЦІЯ

Свістільнік Р.Ф. Розробка технології електропровідних композитних покриттів для джерел тепла технічного призначення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 16 – хімічна та біоінженерія за спеціальністю 161 хімічні технології та інженерія. Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2024.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливого науково-прикладного завдання, яке полягає у створенні електропровідних композитних покриттів для гнучких та жорстких нагрівальних елементів технічного призначення.

Актуальність дослідження обумовлена потребою в розробці нових надійних, енергоефективних та безпечних нагрівальних елементів, які можуть бути легко інтегровані в різноманітні застосування. Розробка електропровідних композитів на основі полівінілбутиралу з додаванням наповнювачів дозволяє створювати покриття, що застосовуються в нагрівальних елементах технічного призначення. Метою роботи було розроблення технології електропровідних композитних покриттів мультифункціонального призначення та їх застосування для джерел тепла технічного призначення

У відповідності до мети роботи вирішувалися такі завдання:

-дослідження впливу технології змішування та дисперсії компонентів на властивості електропровідного полімерного композиту;

-отримання електропровідних полімерних композитних покриттів різноманітного складу та дослідження вплив типу, концентрації складових наповнювача на електропровідність полімерних композитів;

-визначення впливу типу полімерної матриці на електричні властивості композитів;

-визначення електричних характеристик електропровідних полімерних композитів таких як питомий опір, вплив температури на опір характеристики потужності;

-створення тестових зразків гнучких нагрівальних елементів на основі отриманих електропровідних полімерних композитів та відпрацювати технологію їх отримання в промислових умовах;

- визначення можливих напрямків впровадження електропровідних полімерних композитів;

Об'єкт дослідження: процес створення полімерних електропровідних композитних покриттів.

Предмет дослідження: технологія електропровідних композитних покриттів для джерел тепла технічного призначення.

Наукова новизна одержаних результатів.

Основні положення, що визначають наукову новизну дисертаційної роботи полягають у наступному:

Уперше встановлено вплив діелектричного наповнювача, зокрема карбонату кальцію, на електричні властивості полімерних композитних електропровідних покриттів. Виявлено, що введення карбонату кальцію сприяє концентруванню електропровідного наповнювача у полімерній матриці і зумовлює утворення більш ефективної перколяційної часток електропровідного наповнювача.

Виявлено вплив поверхнево-активної речовини на електричні властивості полімерних композитних електропровідних покриттів. Завдяки хімічному диспергуванню електропровідного наповнювача відбувається формування стійкої перколяційної структури.

Встановлено вплив термічної обробки композитних покриттів, що містять полівінілбутираль на їх електричні властивості. При первинному

нагрівання композитного покриття до температури понад 100°C відбувається виділення низькомолекулярних сполук з полівінілбутиралу та зміна його структури, що забезпечує зниження електричного опору та його стабільне значення при наступних циклах нагрівання.

Практичне значення роботи. Розроблено технологічні схеми процесу одержання електропровідних покриттів для створення гнучких та жорстких нагрівальних елементів.

Запропоновано застосування композитного електропровідного покриття для створення макетів військової техніки, котрі володіють здатністю відбивати електромагнітні хвилі.

Практично підтверджено можливість застосування композитного електропровідного покриття під час створення метаматеріалів, котрі здатні поглинати електромагнітне випромінювання.

Наукові дослідження виконувались в рамках ініціативної тематики «Розробка технології одержання композитних матеріалів спеціального призначення», державний реєстраційний номер 0123U100731, 01.2023-06.2027рр. та ініціативної тематики «Розробка технології одержання нетканих полімерних матеріалів спеціального призначення», державний реєстраційний номер 0123U100732, 01.2023-06.2027рр. Роль здобувача полягає у безпосередньому здійсненні експериментальних досліджень та аналізі їх результатів. Крім того, результати дослідження були використані при виконанні госпдоговору №1179 від 16.11.2022 ТОВ «АЙ ДАБЛ-Ю ХОУМ» «Розробка технології виготовлення покриття спеціального призначення, що здатне відбивати електромагнітне випромінювання». Роль здобувача полягає у розробці рецептури та створенні рідкого полімерного композиту та дослідженні його властивостей.

За результатами досліджень отримано акти впровадженень про створення нагрівальних елементів методом 3д друку та застосування композитного покриття при створенні макетів військової техніки.

Результати досліджень впроваджені в освітній процес підготовки фахівців за спеціальністю 161 – хімічні технології та інженерія, за освітньою програмою «Хімічні технології полімерних і композиційних матеріалів» на кафедрі хімічних технологій та ресурсозбереження КНУТД, використовуються при підготовці лекційних курсів, кваліфікаційних робіт магістрів.

Ключові слова: електропровідні полімерні композити, полімери, сажа, графіт, молекулярна маса, електропровідність, нагрівальний елемент, математична модель, числове моделювання, моделювання, металеве покриття, хімічна металізація, зона дозування, динамічний змішувач, прогнозування дизайну, полімерні композити, мідь, металонаповнені полімерні композити, мідна оболонка.

ABSTRACT

Svitilnik R.F. Development of technology for electrically conductive composite coatings for technical heating elements. - Qualification scientific work as a manuscript. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 16 - chemical and bioengineering, specialty 161 chemical technologies and engineering. Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, 2024.

The dissertation is devoted to solving an important scientific and applied problem, which consists in creating electrically conductive composite coatings for flexible and rigid heating elements for technical purposes.

The relevance of the research is due to the need to develop new reliable, energy-efficient, and safe heating elements that can be easily integrated into various applications. The development of electrically conductive composites based on polyvinyl butyral with the addition of fillers allows the creation of coatings used in heating elements for technical purposes.

The aim of the work was to develop a technology for multifunctional electrically conductive composite coatings and their application for technical heating sources.

In accordance with the aim of the work, the following tasks were solved:

Study of the influence of the mixing and dispersion technology of the components on the properties of the electrically conductive polymer composite;

Obtaining electrically conductive polymer composite coatings of various compositions and studying the influence of the type, concentration of filler components on the electrical conductivity of polymer composites;

Determination of the influence of the type of polymer matrix on the electrical properties of the composites;

Determination of the electrical characteristics of electrically conductive polymer composites such as specific resistance, the influence of temperature on resistance, and power characteristics;

Creation of test samples of flexible heating elements based on the obtained electrically conductive polymer composites and testing their production technology under industrial conditions;

Determination of possible directions for the implementation of electrically conductive polymer composites.

Object of research: the process of creating electrically conductive polymer composite coatings.

Subject of research: technology of electrically conductive composite coatings for technical heating sources.

Scientific novelty of the obtained results.

The main provisions that determine the scientific novelty of the dissertation work are as follows:

For the first time, the influence of a dielectric filler, in particular calcium carbonate, on the electrical properties of polymer composite electrically conductive coatings was established. It was found that the introduction of calcium carbonate promotes the concentration of the electrically conductive filler in the polymer matrix and causes the formation of a more efficient percolation structure of the electrically conductive filler particles.

The influence of the surfactant on the electrical properties of polymer composite electrically conductive coatings was revealed. Due to the chemical dispersion of the electrically conductive filler, a stable percolation structure is formed.

The effect of thermal treatment of composite coatings containing polyvinyl butyral on their electrical properties was established. During the initial heating of the composite coating to a temperature above 100°C, low-molecular compounds are released from polyvinyl butyral and its structure changes, which ensures a decrease in electrical resistance and its stable value during subsequent heating cycles.

Practical significance of the work.

Technological schemes for the production of electrically conductive coatings for the creation of flexible and rigid heating elements have been developed.

The application of composite electrically conductive coating for creating models of military equipment that have the ability to reflect electromagnetic waves is proposed.

The possibility of using composite electrically conductive coating in the creation of metamaterials capable of absorbing electromagnetic radiation has been practically confirmed.

Scientific research was carried out within the framework of the initiative theme "Development of technology for obtaining composite materials for special purposes", state registration number 0123U100731, 01.2023-06.2027 and the initiative theme "Development of technology for obtaining non-woven polymer materials for special purposes", state registration number 0123U100732, 01.2023-06.2027. The role of the applicant is in the direct conduct of experimental research and analysis of their results. In addition, the research results were used in the implementation of the contract №1179 dated 16.11.2022 LLC "AI W HOME" "Development of technology for the production of special-purpose coatings capable of reflecting electromagnetic radiation".

The role of the applicant is to develop the formulation and create a liquid polymer composite and study its properties.

As a result of the research, implementation acts were obtained on the creation of heating elements by 3D printing and the use of composite coating in the creation of models of military equipment.

The research results have been implemented in the educational process of training specialists in the specialty 161 - chemical technologies and engineering, according to the educational program "Chemical technologies of polymer and composite materials" at the Department of Chemical Technologies and Resource Saving of KNUTD, and are used in the preparation of lecture courses and qualification works of masters.

Key words: Conductive polymer composites, polymers, soot, graphite, molecular mass, conductivity, heating element, mathematical model, numerical modeling, modeling, metal coating, chemical metallization, dosing zone, dynamic mixer, design forecasting, polymer composites, copper, metal-filled polymer composites, copper shell.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Свістільнік, Р. Ф., Федорів, Т. Р., Савченко, Б. М.; Осауленко, С. І. (2022). Розробка технології електропровідних гібридних композиційних покриттів. Технології та інжиніринг ст. 60–70. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.4.5> Фахове Видання кат. Б.

2. 2. Свістільнік Р. Ф., Федорів Т. Р. Дослідження впливу температури на електропровідні властивості полімерних композитних покриттів. Технології та інжиніринг, № 5(14), 2023 ст. 101–109. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.6.8> Фахове Видання кат. Б.

3. Свістільнік Р. Ф., Федорів Т. Р. Вплив полімерних матриць на електричні властивості композитних покриттів. Технології та інжиніринг, № 6(14), 2023. ст. 115–122. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.5.10> Фахове Видання кат. Б.

4. Свістільнік Р.Ф., Савченко Б.М., Федорів Т.Р. Створення полімерних гібридних струмопровідних покриттів Х Ювілейна Міжнародна науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти та молодих учених «Хімія та сучасні технології» / тези доповідей, 23-24 листопада. – У 6-и томах. Ст. 137-138. – Т. II. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ. – 2021 <https://udhtu.edu.ua/studentskinaukovizahodu> Тези доповідей.

5. Савченко Б.М. Свістільнік Р.Ф., Федорів Т.Р. Електропровідні композитні покриття. отримання та властивості. Композиційні матеріали : монографія за матеріалами XII Міжнародної науково-практичної WEB-конференції (квітень 2023 р.) / укладач: Л. І. Мельник. – Львів – Торунь : Liha-Pres, 2023. – С 85-89 Тези доповідей.

6. Савченко Б.М., Слепцов О.О., Свістільнік Р.Ф. Температурна залежність питомого електричного опору струмопровідних полімерних покриттів. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем

(КЗЯТПС – т 2023) : матеріали тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції. Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – Т. 1.- С.341-342 Тези доповідей.

7. Свістільнік Р. Ф., Федорів Т. Р. Слепцов О.О. Вплив полімерної основи на електричні властивості захисних покриттів. Всеукраїнська конференція «Освіта для сталого майбутнього: екологічні, технологічні, економічні і соціокультурні питання» жовтень 2023, Київ. ст. 158-161 Тези доповідей.

8. Kovalchuk O.V., Kovalchuk T.M., Harbovskyi Yu.A. Lahoda O.A. Svistilnik R. F., Pushkarov D. V. Volokh L.V., Oleinykova I.V. Temperature dependence of the dielectric properties of a nanocomposite material based on linear polyethylene at the beginning of the percolation transition. Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics (SPQEO). 2023. №1 P. 041-048. <https://doi.org/10.15407/spqeo26.01.041> Scopus, Q 4.

9. Булгаков Є. С., Савченко Б. М., Іскандаров Р. Ш., Свістільнік Р. Ф., Пушкарьов Д. В. Застосування біорозкладних полімерів при виготовленні нектаних фільтрувальних матеріалів. Технології та інжиніринг, № 3(14), 2023. ст. 36-46. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.3.4> Фахове видання кат. Б.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПКЕП-полімерні композитні електропровідні покриття

КЕП-композитні електропровідні покриття

ПВБ-полівінілбутираль

ПУ-поліуретан

НЦ-нітроцелюлоза

БС-бакелітова смола

ВАХ-вольтамперні характеристики

ТКО-температурний коефіцієнт опору

CNT-вуглецеві нанотрубки

CF-вуглецеві волокна

ЕПК-електропровідні полімерні композити

ВСТУП

Сучасна промисловість широко застосовує відновлювані джерела низькопотенційної енергії з рівнем напруги 12-48 В, що є типовим для транспортних засобів. Для цих джерел енергії активно використовуються плівкові нагрівальні елементи, які відрізняються простою конструкцією і можуть бути нанесені на об'єкти зі складною геометрією або гнучкі субстрати. Актуальним завданням є розробка плівкових нагрівальних елементів з вітчизняної сировини та застосування доступних технологій. Енергія з низькопотенційних джерел може бути перетворена до промислових рівнів напруги, таких як 220 або 380 В, але це супроводжується суттєвими втратами. Найбільш доцільним шляхом її використання є перетворення на локальне тепло, а не транспортування. Один із способів перетворення низькопотенційної енергії - плівкові нагрівальні елементи, які широко застосовуються у автомобільній промисловості для локального нагріву.

Плівкові нагрівальні елементи застосовуються в різних галузях та для різноманітних цілей, завдяки їхній ефективності, гнучкості та можливості забезпечувати рівномірний розподіл тепла, зокрема: в системах підлогового опалення, особливо під керамічною плиткою та ламінатом, оскільки вони тонкі та ефективно передають тепло; для обігріву в медичних приладах, наприклад, в інкубаторах для новонароджених або в обладнанні для обігріву крові та рідин; для обігріву сидінь, дзеркал заднього виду, допомагаючи підтримувати комфорт та безпеку під час холодної погоди; в торговельному обладнанні, такому як холодильні вітрини для запобігання конденсації на склі; в такій побутовій техніці, як електричні чайники, плоскі праски, тощо, де потрібне швидке та ефективне теплове регулювання; для управління температурою в чутливих електронних пристроях, забезпечуючи захист від переохолодження та перегрівання; для обігріву теплиць та інших аграрних споруд, що дозволяє забезпечити стабільне зростання рослин незалежно від

зовнішніх погодних умов.

Це лише деякі приклади застосування плівкових нагрівальних елементів, які демонструють їх універсальність і здатність задовольняти специфічні потреби в широкому спектрі застосувань.

Актуальність теми.

Актуальність дослідження обумовлена потребою в розробці нових ефективних і функціональних нагрівальних елементів, які можуть знайти застосування у різних сферах. Завдання полягає в створенні надійних, енергоефективних та безпечних нагрівальних елементів, які можуть бути легко інтегровані в різноманітні застосування. Розробка електропровідних композитів на основі полівінілбутиралу з додаванням наповнювачів дозволяє створювати покриття, що застосовуються в нагрівальних елементах різноманітного призначення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові дослідження виконувались в рамках ініціативної тематики «Розробка технології одержання композитних матеріалів спеціального призначення», державний реєстраційний номер 0123U100731, 01.01.2023 - 30.06.2027 рр. та ініціативної тематики «Розробка технології одержання нетканих полімерних матеріалів спеціального призначення», державний реєстраційний номер 0123U100732, 01.01.2023 - 30.06.2027 рр. Роль здобувача полягає у безпосередньому здійсненні експериментальних досліджень та аналізі їх результатів. Крім того, результати дослідження були застосовані при виконанні госпдоговору № 1179 від 16.11.2022 р. ТОВ «АЙ ДАБЛ-Ю ХОУМ» «Розробка технології виготовлення покриття спеціального призначення, що здатне відбивати електромагнітне випромінювання». Роль здобувача полягає у формулюванні та створенні рідкого полімерного композиту та дослідженні його властивостей.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи було розроблення технології електропровідних композитних покриттів мультифункціонального призначення та їх застосування для джерел тепла технічного призначення

У відповідності до мети роботи були поставлені такі завдання дослідження:

-дослідити вплив технології змішування та дисперсії компонентів на властивості електропровідного полімерного композиту;

-отримати електропровідні полімерні композитні покриття різноманітного складу та дослідити вплив типу, концентрації складових наповнювача на електропровідність полімерних композитів;

-дослідити вплив типу полімерної матриці на електричні властивості композитів;

-визначити експлуатаційні характеристики електропровідних полімерних композитів такі як питомий опір, вплив температури на опір характеристики потужності;

-створити тестові зразки гнучких нагрівальних елементів на основі отриманих електропровідних полімерних композитів та відпрацювати технологію їх отримання в промислових умовах;

-визначити можливі напрямки впровадження електропровідних полімерних композитів;

Об'єкт дослідження: процес створення полімерних електропровідних композитних покриттів.

Предмет дослідження: технологія електропровідних композитних покриттів технічного призначення.

Методи дослідження. Експериментальні дані було отримано з використанням стандартних методик та розроблених методів дослідження.

Дослідні зразки композитних електропровідних покриттів одержували шляхом аплікування розчину композиту на різноманітні субстрати з використанням регульованого щілинного, роликового аплікаторів та методом

аеродинамічного наплення. Рідкий полімерний композит одержували шляхом диспергування електропровідних наповнювачів за допомогою тривалкової фарботерки, ступкового млина та роторного дисперсера.

Електричні властивості КЕП вимірювали використовуючи 2-х та 4-х електродні комірки та вимірювачі опору, а питомі значення опору розраховували. Температурну залежність опору вимірювали на створеному автором стенді з використанням нагрівальної комірки. Зразки нагрівальних елементів створювали в лабораторних умовах з використанням розроблених методик та визначали їх електричні характеристики на стенді.

Наукова новизна одержаних результатів. Отримані в процесі дослідження наукові результати в сукупності дозволили розв'язати важливе науково-прикладне завдання, яке полягає у створенні електропровідних композитних покриттів для гнучких і жорстких нагрівальних елементів технічного призначення.

Основні положення, що визначають **наукову новизну** дисертаційної роботи полягають у наступному:

Уперше встановлено вплив діелектричного наповнювача, зокрема карбонату кальцію, на електричні властивості полімерних композитних електропровідних покриттів. Виявлено, що введення карбонату кальцію сприяє концентруванню електропровідного наповнювача у полімерній матриці і зумовлює утворення більш ефективної перколяції часток електропровідного наповнювача.

Виявлено вплив поверхнево-активної речовини на електричні властивості полімерних композитних електропровідних покриттів. Завдяки хімічному диспергуванню електропровідного наповнювача відбувається формування стійкої перколяційної структури.

Встановлено вплив термічної обробки композитних покриттів, що містять полівінілбутираль на їх електричні властивості. При первинному нагрівання композитного покриття до температури понад 100°C відбувається

виділення низькомолекулярних сполук з полівінілбутиралу та зміна його структури, що забезпечує зниження електричного опору та його стабільне значення при наступних циклах нагрівання.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено технологічні схеми процесу одержання електропровідних покриттів для створення гнучких та жорстких нагрівальних елементів.

Запропоновано застосування композитного електропровідного покриття для створення макетів бойової техніки, котрі володіють здатністю відбивати електромагнітні хвилі.

Практично підтверджено можливість застосування композитного електропровідного покриття під час створення метаматеріалів, котрі здатні поглинати електромагнітне випромінювання.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем проведено вибір полімерних зв'язуючих та електропровідних наповнювачів для створення електропровідних полімерних покриттів та нагрівальних елементів і визначено можливості їх застосування. Розроблені методи дослідження електричних, термічних властивостей електропровідних композитних покриттів. Здобувач особисто виконував експерименти, які включали підготовку зразків електропровідних покриттів, їх нанесення на субстрати та подальше тестування отриманих нагрівальних елементів. Експериментальна частина дослідження охоплювала широкий спектр випробувань, від вимірювань електропровідності до аналізу впливу температури.

Здобувачем зроблено ретельний аналіз зібраних даних, що дозволило виявити залежності між складом покриттів, їх властивостями та ефективністю нагрівальних елементів. Особлива увага приділялася вивченню впливу різних типів наповнювачів на електропровідність та електричні характеристики нагрівальних елементів. На підставі отриманих результатів здобувач сформулював ряд нових наукових ідей, що стосуються покращення властивостей електропровідних покриттів та нагрівальних елементів. Ці ідеї

мають потенціал для практичного застосування в розробці нових видів нагрівальних елементів для різноманітних застосувань.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати дисертаційних досліджень представлялись та обговорювались на 3-х міжнародних та 1-й всеукраїнській наукових конференціях: X Ювілейній Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених «Хімія та сучасні технології» (Дніпро, 23-24 листопада 2021); XII Міжнародній науково-практичній WEB-конференції (Київ, квітень 2023 р.); XIII Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, 25–26 травня 2023 р.); I Всеукраїнській конференції «Освіта для сталого майбутнього: екологічні, технологічні, економічні і соціокультурні питання» (Київ, жовтень 2023).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 9 наукових робіт, зокрема 4 статті у фахових виданнях, 1 стаття у науковому виданні, що входить до науково-метричної бази Scopus, 4 тези доповідей на Міжнародних Всеукраїнській та конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатку. Загальний обсяг дисертації становить 240 сторінки. Дисертація містить 73 таблиць, 116 рисунків, бібліографію, яка включає 257 посилань на праці вітчизняних і зарубіжних авторів та 4 додаток.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ В ГАЛУЗІ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

1.1 Електропровідні полімерні композити

Електропровідні полімерні композити (ЕПК) утворюють шляхом змішування діелектричної полімерної матриці з електропровідними наповнювачами, такими як сажа (СВ), вуглецеві волокна (СF), вуглецеві нанотрубки (СNT) або будь-які відповідні частинки наповнювача, які створюють хороший електропровідний шлях через полімерну матрицю [1]. ЕПК демонструють декілька цікавих характеристик, таких як висока електропровідність, мала вага, стійкість до корозії та хороші механічні характеристики [1-3]. Тим не менш, його морфологія та структура провідних мережевих шляхів у складовій матриці є ключовими параметрами для кращої електропровідності КПК [2]. Сучасна технологія запропонувала ЕПК в різних сферах застосування, включаючи датчики, компоненти схемних пристроїв, акумулятори, електроди паливних елементів і біполярні пластини паливних елементів [1,3-9]. Для того, щоб матеріал став електропровідним, концентрація провідної фази повинна бути вище порогу перколяції, як детально описано в теорії перколяції. Кореляція, яка існує між електропровідністю частинок наповнювача в різних полімерних матрицях і концентраціях наповнювача, зазвичай залежить від об'ємної частки компонентів і морфології наповнювача [10,11]. Теорія перколяції класифікується на дві основні області; нижче порогу перколяції і вище порогу перколяції (Рис. 1). В області нижче порогу перколяції електропровідність еквівалентна електропровідності ізоляційної полімерної матриці при низьких навантаженнях наповнювача, оскільки частинки наповнювача диспергуються без утворення провідної мережі по всьому композиту. У міру збільшення концентрації наповнювача утворюються безперервні провідні мережі до досягнення певної критичної об'ємної частки,

відомої як поріг перколяції. За межею перколяції провідна сітка збільшується зі збільшенням концентрації наповнювача, поки електропровідності не вийде на плато [11].

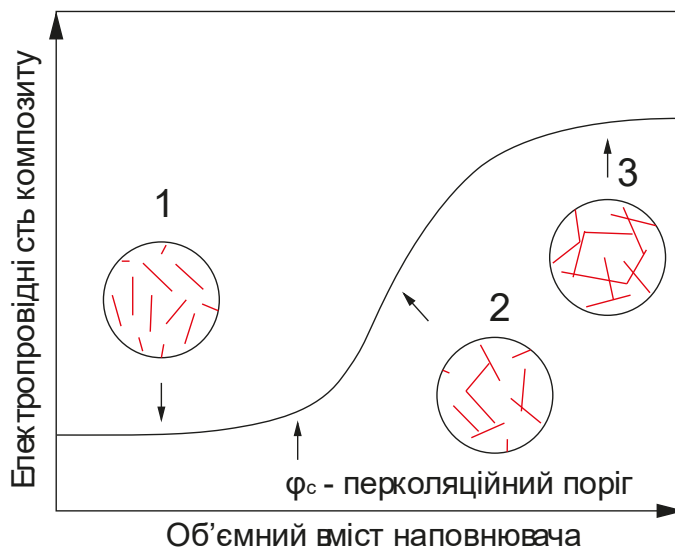


Рисунок 1. - Перколяційна крива полімерних композитів: В області 1 поріг перколяції не досягнутий, і провідність композиту приблизно дорівнює провідності полімерної матриці; В області 2 перколяція досягнута, і провідність композиту зростає до високих значень; В області 3 досягається оптимальна електропровідність полімер-композиту, що виходить на плато.

Дослідження показали, що існують численні фактори, які можуть впливати на електропровідність полімерного композиту, такі як розподіл наповнювача, форма та розмір, співвідношення сторін, провідність наповнювача та взаємодія з матрицею, природа полімерної матриці, змочуваність, форма, орієнтація, спосіб виготовлення [1,10-23]. На основі цих факторів були запропоновані різні моделі для прогнозування електропровідності композитних матеріалів. Однак більшість моделей зазвичай використовують об'ємну частку як основу розрахунків при прогнозуванні електропровідності композитної системи [11]. Підводячи

підсумок, все ще необхідно зрозуміти кореляцію між запропонованою моделлю та експериментальним значенням електропровідності.

1.2 Сучасні моделі електропровідності полімерних композитних матеріалів

На даний час модель, яка використовується для прогнозування електропровідності ЕПК, є Модель General Effective Media (GEM), розроблена Маклакланом. Більшість дослідників використовували модель GEM у своїх дослідженнях за рахунок отримання електропровідності, яка має бути ближче або вище порогу перколяції, і це так підходить для композитів із кількома наповнювачами [13,24]. Бартон і Лея у своїй роботі пояснили, що модель GEM підходить для використання декількох або одного наповнювача, які відповідають даним про питомий опір особливо в наповнювачах з технічним вуглецем [13,25]. Рівняння GEM показує гарну узгодженість між вуглецевим волокном, сажею і синтетичним графітом з термопластичним матеріалом Vestra у порівнянні з експериментальними даними [13, 25]. Бартон припустив, що більш висока електропровідність полімерного композиту може бути досягнута, коли електропровідність наповнювача знаходиться недалеко один від одного, що підтверджується використанням наповнювачів з більш високою електропровідністю, які сприяють кращій електропровідності композитного матеріалу. [26, 27].

Проте все ще існує багато обмежень через суперечливі експериментальні та теоретичні результати. Моделі, створені на основі припущень, зазвичай не можуть задовольнити вимоги кожного випадку. Оригінальне рівняння GEM може передбачити електропровідність лише для складних і множинних композицій лише тоді, коли рівняння відповідно модифіковано [28]. Бартон довів це, використовуючи синтетичний графітовий матеріал, де не було

узгодженості з експериментальними даними при використанні необ'ємного пресованого графіту [13]. Критичний показник t визначається морфологією та структурою провідних частинок. Більш високе t -значення, яке коливається між 6-8 за допомогою регресії та отримане при нанесенні на структурний матеріал графітових пластівців, показує, що на t -значення впливає екстремальна геометрія провідної частинки [10,26]. Бартон пояснив, що t -значення кількох наповнювачів трохи вище, ніж одного наповнювача через комбінацію частинок різної морфології та дисперсії [26]. Мамуня повідомив, що t -значення здається вищим за універсальне $t = 1,7$, використовуючи полімер, наповнений металом, у моделі Мамуні, оскільки морфологічна система є анізотропною або має складну структуру матеріалу [21]. Крім того, збільшення t -значення в кількох наповнювачах може спричинити орієнтацію частинок наповнювача та створення більш екстремальної геометрії, ніж композит з одним наповнювачем. Балберг пояснив, що різні типи наповнювача з різним розміром частинок призводять до різних значень t через різну ефективність частинок наповнювача та різні види провідних мереж [12].

Незважаючи на той факт, що дослідник повідомив, що ефективні комплексні параметри наповнених вуглецем композитів повинні залежати від властивостей волокон, таких як співвідношення сторін, концентрація, провідність і швидкість вирівнювання, щоб оптимізувати орієнтоване вуглецеве волокно та максимізувати електропровідність [14, 29]. У літературі Какаті також повідомляється, що модель GEM не підходить для вимірювання електропровідності полімерного композиту з високою провідністю для більш ніж двох компонентів у системі як для провідності в площині, так і через її анізотропну характеристику. [28].

Бартон зазначив, що провідність через площину часто не враховується в системі вимірювання електропровідності, оскільки напрямки наповнювача зазвичай вирівнюються в одному напрямку [26]. Зазвичай результати експериментів у напрямку в площині вищі, ніж у напрямку через площину. Тим

не менш, ці розриви в електропровідності все ще можна зменшити, додавши сажу як другий наповнювач або використовуючи наповнювач правильної форми, щоб мінімізувати явище анізотропії та точно передбачити електропровідність композитного матеріалу [19, 24, 26, 28]. Тому, щоб протистояти цим обмеженням, Какаті запропонував модифіковану модель GEM, яка визначила власне t -значення для прогнозування електричного моделювання з чотирма компонентами [28]. Як результат, модель здатна однаково точно прогнозувати як у площині, так і через площину, але без урахування орієнтації та фактора форми різних використовуваних наповнювачів. Ці обмеження призводять до змін у геометричному середовищі, оскільки змінюється концентрація наповнювача та його об'ємна частка. Ці модифіковані моделі GEM не мають обмежень щодо орієнтації наповнювача та фактора форми різних використовуваних наповнювачів. Було виявлено, що використання фенолоформальдегідної смоли з природним графітовим армуванням із вуглецевою технікою та вуглецевим волокном значно покращило електропровідність композитної біполярної пластини як у площині, так і в площині за низьких навантажень наповнювача. В даний час дослідники також зосереджуються на покращенні механічних властивостей шляхом аналізу кожного використовуваного параметра замість того, щоб максимізувати показники електропровідності провідного полімерного композиту для задоволення вимог [1]. Подробиці кожної моделі наведено в таблиці 1.

Існує багато моделей електропровідності, щоб забезпечити отримання точних даних, таким чином зводячи до мінімуму експеримент, проведений із прогнозуванням електропровідності полімерного композитного матеріалу. У 1995 році Люкс детально описав чотири основні класи моделей електропровідності, які в основному зустрічаються в літературі, тобто статистичні, термодинамічні, геометричні та структурно-орієнтовані моделі. Ці класи зазвичай використовуються для прогнозування електропровідності на

основі врахованого параметра, що описаний раніше. Однак дані моделі зазвичай пропонувалися для вивчення та прогнозування об'ємної концентрації перколяції, тоді як поточні дослідження націлені більше на максимальну перколяцію, яку можна отримати та пізніше використовувати для прогнозування електропровідності [20]. Метод обробки також по різному впливає на перколяцію або провідність композиту через відсутність неоднорідності в розподілі частинок. Тому, щоб подолати ці проблеми, дослідники запропонували структурно-орієнтовану модель на базі основних параметрів для визначення детальної структури сировини за допомогою теоретичної структури моделі. Однак детальне визначення кожного параметра спричинить меншу похибку, що в кінцевому підсумку вплине на результати експерименту. При використанні низького вмісту наповнювача ефект додавання електропровідних наповнювачів малого розміру як вторинного наповнювача полягає в тому, що він здатний підвищити електропровідність композитного полімеру [30]. Збільшення провідності відбувається за рахунок вторинного наповнювача малого розміру, який заповнює порожнечу, що існує між первинними наповнювачами, таким чином посилюючи мережі провідності в композиційній полімерній матриці. Однак значення провідності в площині все ще далеко одне від одного в порівнянні зі значенням через площину. Антунес детально пояснив вміст наповнювача, згідно з яким для звичайних матеріалів ЕПК концентрація провідного наповнювача зазвичай становить менше 10 мас.%, тоді як для застосування композитних біполярних пластин концентрація підвищується до 60-80 мас.% [31,32].

Кіт досліджував електропровідність композиту з одним наповнювачем за низького вмісту наповнювача, використовуючи дві окремі моделі електропровідності [19]. Згідно з їхніми експериментальними результатами, як і модель Мамуні, так і адитивна модель добре відповідають експериментальним даним. Однак, модифікувавши адитивну модель на чотири регульовані параметри, здавалося, що модель краще відповідає

експериментальним даним із використанням поліметилматокрилату (ПММА) і сажі в процесі компресійного формування порівняно з моделлю Мамуні, яка фактично може бути зменшена до двох регульованих параметрів. Адитивна модель здатна вловити ефекти явища перколяції, структуру та ефект поверхневої енергії. На відміну від Кіта, Бартон запропонував альтернативні моделі; тобто експоненціальна та геометрична моделі, оскільки електропровідність перевершила моделі Мамуні та адитивні моделі з високим погодженням в діапазоні експериментальних даних, що підходить для застосувань біполярних пластин [24]. Запропоновані альтернативні моделі відповідали експериментальним даним поза максимальною концентрацією наповнювача. Бартон пояснив, що і модель Мамуні, і адитивна модель краще узгоджуються з експериментальними даними [13], однак обидві моделі не підходили при адаптації з використанням системи з декількома наповнювачами порівняно з рівняннями GEM, оскільки вони обмежувалися лише окремими наповнювачами [13, 26].

У 2002 році Мамуня експериментував з моделлю, що використовує окремі металеві частинки як наповнювачі, враховуючи коефіцієнт упаковки в моделях, який відрізняється від Лукс [20, 21]. Мамуня пояснив важливість фактора упаковки, оскільки концентрація металевих наповнювачів залежить як від електро-, так і від теплопровідності. Ці фактори упаковки, F , впливають на топологію фази та форму частинок, що пізніше впливає на концентрацію наповнювача. Мамуня повідомив, що значення коефіцієнта упаковки для Cu (мідь) і Ni (нікель) становили 0,30 і 0,52 відповідно через дендритну форму частинок міді, тоді як частинки нікелю були набагато ближчими до теоретичного значення сфери, $F = 0,64$. Проте, визначивши кореляцію між порогом перколяції та коефіцієнтом упаковки критичного параметра, X показує збіг того, що значення X для систем Cu та Ni однакові, що вказує на відсутність взаємодії полімерного наповнювача в системах. Крім того, Мамуня також пояснив, що було використано більше критичне експоненціальне t -

значення, ніж універсальне значення, оскільки система враховує концентрації провідного наповнювача в кожній моделі. Останні дослідження Кассім використовували модель Мамуні з регульованим параметром для підгонки експериментальних даних композиту сажа-полімер, коли модель GEM не підходила точно для вищих концентрацій наповнювача, оскільки рівняння моделі здебільшого залежать від композитного матеріалу [33]. Кассім повідомив, що хороша узгодженість отримана лише для вмісту наповнювача вище критичної концентрації перколяції, а не нижче порогової точки перколяції [33].

Маклахлан запропонував модель, подібну до статистичної моделі, розширивши сферу застосування теорії перколяції. Модель вимагає обчислення критичної експоненти- t на основі експериментальних даних. Двейрі пояснив, що експериментальні дані про електропровідність поліпропіленових/графітових композитів при високих навантаженнях наповнювача відповідають моделі Маклахлана з використанням вищих значень експоненціального t , які коливаються між 6-8 [10]. Отримані значення t набагато вищі порівняно з очікуваними типовими значеннями через частинки графіту, які прагнуть рівномірно розподілитися всередині матриці, що призводить до меншої кількості частинок для контакту. Двайрі та Какаті запропонували використовувати моделювання цифрового аналізу зображень для опису електричної поведінки композитів [10, 18]. Провідність композиту залежить від збільшення, яке використовується в аналізі мікроструктурного зображення. Таким чином, максимізація зображення збільшить площі графітового наповнювача, що призведе до вищої електропровідності. Покращення, які можна зробити за допомогою 3D-вигляду, важливі для точного прогнозування часток площі наповнювачів, оскільки якість СЕМ-зображень низька.

Опис моделей електропровідності для високопрохідних полімерних
композитних матеріалів

Модель	Рівняння моделі	Посилання
Загального ефективного середовища (GEM)	$\frac{(1 - \varphi) \left(\sigma_l^{\frac{1}{t}} - \sigma_m^{\frac{1}{t}} \right)}{\sigma_l^{\frac{1}{t}} + A \sigma_m^{\frac{1}{t}}} + \frac{\varphi \left(\sigma_h^{\frac{1}{t}} - \sigma_m^{\frac{1}{t}} \right)}{\sigma_h^{\frac{1}{t}} + A \sigma_m^{\frac{1}{t}}} = 0$	[13, 24]
Модифікована адитивна модель	$\log(\sigma) = \log(\sigma_m) + \sigma_p (\varphi - \varphi_c)^{G/(\varphi - \varphi_c)^n} + \sigma$	[19]
Модифікована модель волоконного контакту	$\sigma_c = \sigma_m + \left[\frac{4}{\pi} \left(\frac{d_c}{d} \right) \left(\frac{l}{d} \right) (\cos^2 \theta) (\varphi_{overall} \sigma_f X) \right]$	[11, 30]
Модель Маклаклана	$\frac{(1 - \varphi) \left(\rho_m^{\frac{1}{t}} - \rho_f^{\frac{1}{t}} \right)}{\rho_m^{\frac{1}{t}} + ((1 - \varphi_c)/\varphi_c) \rho_f^{\frac{1}{t}}} + \frac{\varphi \left(\rho_m^{\frac{1}{t}} - \rho_p^{\frac{1}{t}} \right)}{\rho_m^{\frac{1}{t}} + ((1 - \varphi_c)/\varphi_c) \rho_p^{\frac{1}{t}}} = 0$	[27]
Статистично-термодинамічна модель	$\sigma_m = \sigma_p + \frac{\sigma_f - \sigma_p}{1 + \exp[-(\varphi - PCP)/w]}$	[27]
Модель Скарісбріка	$\frac{\sigma_c}{\sigma_f} = \varphi X \varphi \left[\exp \left(\varphi^{-\frac{2}{3}} \right) \right] x C^2$	[23]
Рівняння теорії перколяції	$\sigma = \sigma_c + (\sigma_m - \sigma_c) + [(\varphi - \varphi_c)/(F - \varphi_c)]^t$	[21]
Модель Брюггемана	$\sum_i \varphi_i \int_0^1 dL \frac{\varphi(L)}{S_i + L} = 0, S_i = \sigma_{eff} / (\sigma_i - \sigma_{eff})$	[16]
Ефективна модель середнього розміру	$(1 - \varphi) \frac{\sigma_1 - \sigma_{effective}}{\sigma_1 - 2\sigma_{effective}} + \varphi \frac{\sigma_2 - \sigma_{effective}}{\sigma_2 - 2\sigma_{effective}} = 0$	[14]
«Псевдоафінна» модель деформації	$\tan \theta = \frac{\lambda_x}{\lambda_2} \tan \theta' \left[\frac{1 + \left(\frac{\lambda_y}{\lambda_x} \right)^2 \tan^2 \varphi'}{(1 + \tan^2 \varphi^2)} \right]^{\frac{1}{2}}, \tan \theta = \frac{\lambda_x}{\lambda_2} \tan \theta'$	[31]
Модель волоконного контакту (FCM)	$\sigma_{c, longitudinal} = \frac{\pi d^2 \rho_f X}{4 \varphi_p d_c l \cos^2 \theta}$	[32]

Однак останні публікації стверджують, що різноманітність параметрів, які впливають на електропровідність, призводить до труднощів у розробці моделей електропровідності. Дослідники пропонують математичну функцію як останній підхід до прогнозування електропровідності [11, 22]. Мерзукі використовував математичне рівняння Больцмана для моделювання експериментальних результатів, які пояснювали зміни провідності від низьких концентрацій наповнювача до максимальних концентрацій наповнювача [22]. Розроблена модель, яка представляє в напівлогарифмічному масштабі, здається придатною для представлення провідності композитів на основі концентрації наповнювача протягом усієї концентрації порівняно з моделлю Мамуні, особливо після порогу перколяції. Розбіжність між експериментальною та теоретичною концентрацією ацетиленової сажі пояснює, що модель Мамуні в основному розроблена для прогнозування поведінки сажі в композитних матеріалах за межею перколяції. Крім того, ці розбіжності викликані різницею в поведінці кожного використаного наповнювача, що пояснюється різними режимами дисперсії. Ацетиленова сажа, як правило, має більший поверхневий натяг, ніж сажа, яка менш сумісна з поліпропіленовою матрицею і, таким чином, забезпечує кращу дисперсію та більшу перевагу в покращенні електропровідності. Варіації електропровідності, які зазвичай отримують при проведенні експериментів з полімерними композитами, можуть бути наслідком неправильної дисперсії та локалізації наповнювача в полімерній матриці під час процесу змішування [23].

Де: σ , σ_1 , σ_2 , σ_s , σ_m , σ_f – провідність; ρ , ρ_f , ρ_m - питомий опір; X - номер функції контакту; d , d_c – діаметр; l – довжина; ϕ , ϕ' - об'ємна частка; θ , θ' – орієнтаційний кут; ϕ , ϕ_r , ϕ_s - поріг перколяції; λ , λ_x , λ_y , λ_z - деформація при видовженні; θ' - вихідний кут орієнтації; L - фактор деполяризації сфероїда, $\phi(L)$ - позитивна функція розподілу форми; F - коефіцієнт упаковки(пакінг фактор); t - критична експонента; C - геометричний коефіцієнт (функція від

ϕ); PCP - об'ємна частка наповнювача у середній точці перколяції; w - ширина перколяції; X - коефіцієнт контактного числа волокон; G, A, n - константи.

Тим часом Тагеріан запропонував сигмоїдальну функцію як новий підхід, який спрощує модель провідності та здатний ідеально передбачити електропровідність, враховуючи кут змочування, а не поверхневу енергію [11].

Крім того, модель сигмоїдальної функції також підходить для більшої кількості типів наповнювачів, оскільки підгонка оцінюється параметрами R-квадрат, SSE та RMSE. Отже, обидві попередні моделі передбачають провідність шляхом підгонки експериментальних даних і визначення місцезнаходження кожного фактора залежно від його впливу на композитну матрицю. Як описав Варгас, жодна з моделей не включала важливий параметр, який підвищить електропровідність композиту, включаючи моделі Кіркпатріка, Мамуні, Маклахлана та модель сигмоїдальної функції [27]. Таким чином, було перераховано кілька важливих параметрів, включаючи критичний показник перколяції, наповнювача та провідності матриці, провідність при максимальній частці упаковки, провідність при перколяції та ширину в області перколяції. Однак моделі сигмоїдальної функції спираються лише на експериментальні значення, оскільки ці моделі базуються на групах нелінійної регресії. Варгас також підкреслив, що шляхом визначення діапазону параметрів у моделі Маклахлана можна досягти уявного значення електропровідності.

Сохі пояснив, що модель Скарісбріка припускає, що всі провідні частинки є сферами і випадково розподілені в композитній сполуці [23]. Електропровідність можна підвищити, зменшивши до мінімуму площу зазору між частинками або торкаючись одна одної. Таким чином, модель Скарісбріка припускає, що контакт між частинками є важливим для формування провідної мережі [1, 23]. Однак експериментальна провідність з використанням наповнювача з високим співвідношенням сторін, включаючи MWCNT і SCF (з коротким вуглецевим волокном) перевищила

теоретичний розрахунок, отже створивши кращу провідність мережі навіть за дуже низьких концентрацій. Це було пояснено моделлю Маккалоу, де збільшення експериментальної провідності залежить від збільшення концентрації вмісту наповнювача. Таким чином, провідність більше залежить від структурного фактора, l якого не вистачає при прогнозуванні провідності полімерних композитів. Модель Скарісбріка має кращу узгодженість між експериментальною та теоретичною для вищих концентрацій наповнювача, але не для нижчих концентрацій, що пояснює використання іншого геометричного коефіцієнта наповнювача відповідно до моделі Скарісбріка. Такеда повідомив, що вибрав l як 1,5 для ВНТ як наповнювача композитів [34]. Невеликий зазор між наповнювачем у матриці створює контактний опір, який впливає на електропровідність. Так [34] досліджували використання вуглецевих нанотрубок, розглядаючи два типи провідних мереж, перекриваючий контакт між частинкою наповнювача та контактом у площині, де частинки наповнювача достатньо закриті, щоб забезпечити електричну мережу.

Рівняння моделі зазвичай розробляються на основі окремих експериментів, через що вони відрізняються від теоретичних результатів. Численні використані матеріали та техніки дозволяють отримати іншу модель. Через ці обмеження такі параметри, як розмір і геометрія провідних частинок, ступінь розподілу в ізоляційних матрицях, взаємодія між провідним та ізоляційним матеріалом і метод підготовки, є значущими для мінімізації виникнення помилок [23]. Сохі запропонував нову модифіковану модель Скарісбріка шляхом введення важливих параметрів, включаючи співвідношення розмірів наповнювача, співвідношення площі поверхні до об'єму та провідність полімерної матриці, які дають високу відповідність для композитів етиленвінілацетат (EVA)-MWCNT [23]. Сохі підкреслив, що є лише незначне збільшення провідності, якщо відбувається лише збільшення діаметра частинки, а не збільшення провідних ланцюгів. Тим часом зазвичай

можна спостерігати лише невеликі зміни поведінки провідності нижче та вище межі перколяції. Виникнення явища перколяції можна чітко спостерігати за допомогою цієї модифікованої моделі, оскільки при низьких концентраціях наповнювача електропровідність регулюється провідністю полімеру, тоді як при навантаженні з більшою концентрацією наповнювача на електропровідність композиту в основному впливає провідність самого наповнювача.

Какаті провів дослідження з використанням високого вмісту графітового наповнювача для застосування в паливних елементах [18]. Основну модель моделі Ондречека було модифіковано шляхом врахування як орієнтації, так і факторів форми для електропровідності, особливо для застосувань паливних елементів, які демонструють хорошу кореляцію між експериментальними даними. Попередні моделі Ондречека не змогли передбачити електропровідність, коли провідність між використовуваними наповнювачами була надзвичайно високою через від'ємне значення в розрахунку. Ці обмеження, про які повідомив Какаті, були доведені експериментами, як згадував Люкс [20]. Стосовно всіх класів моделей електропровідності вже згадувалося, що немає такого доказу для підтвердження моделі, навіть якщо існує хороша кореляція між експериментальними результатами та моделлю перколяції. Люкс повідомив, що необхідно враховувати деякі параметри, особливо розмір і геометрію провідних частинок, ступінь розподілу провідних частинок в ізоляційних матрицях, взаємодію між провідним та ізоляційним компонентами та метод індукції орієнтації [20].. Грунтуючись на цьому розумінні, у 2002 році Мамуня запропонував модель, яка описує електропровідність оболонкової структури шляхом застосування рівняння теорії перколяції [21]. Однак отримані результати t-значень трохи перевищують теоретичні значення через отриману складну структуру, оскільки форма частинок і взаємодія полімерного наповнювача не враховувалися в рівнянні. Розмір і форма частинок впливає на поріг перколяції

структури [16,21]. Гончаренко і Венгер застосували модель Бруггемана і погодилися, що для того, щоб заповнити простір, структура кулі або наповнювач еліпсоїдів повинна мати нескінченний діапазон розмірів [16]. Однак для композитів з анізотропною системою розподілу паралельних сфероїдів поріг перколяції не залежить від дисперсії розподілу, що відрізняється від випадково орієнтованих сфероїдів, де поріг перколяції залежить від дисперсії розподілу. Лі запропонував застосувати гібридну систему наповнювачів у провідний полімерний композитний матеріал, оскільки експериментальні результати показали відмінну електропровідність і механічні характеристики в застосуванні біполярних пластин [35]. Сажа та графіт широко використовуються серед дослідників для підвищення електропровідності ЕПК матеріалів. Однак механічні характеристики зазвичай погіршуються зі збільшенням вмісту наповнювача після певного рівня. Таким чином, додавання гібридних наповнювачів, включаючи сажу, MWCNT і вуглецеве волокно, становить менше 7 мас.%, оскільки за цим порогом електропровідність починає знижуватися через відсутність достатньої кількості смоли, здатної зв'язувати наповнювачі. Тенденція електропровідності для наповнювачів з високою провідністю зменшується, коли досягається критичний вміст наповнювача, оскільки наповнювачі не здатні належним чином зв'язуватися всередині матриці.

Орієнтація наповнювача відіграє основну роль в оптимізації електропровідності та механічних характеристик ЕПК матеріалів. Змінюючи напрямок наповнювача, можна контролювати як механічні характеристики, так і електропровідність. Існує кілька методів для стимулювання орієнтації наповнювача в матеріалах ЕПК, включаючи використання наповнювачів із високим співвідношенням сторін, зсувних сил у процесі екструзії, вирівнюючи наповнювачі в контрольованому напрямку, можна контролювати механічні характеристики, електропровідність та інші характеристики залежно від потреб застосування[32, 36-42]. Вирівнювання вздовж Z-напрямку найбільше

посилить провідність [43]. Зазвичай використовувані матеріали, такі як вуглецеве волокно, вуглецеві нанотрубки (CNT), графен або будь-який провідний наповнювач із максимальним співвідношенням сторін, значно знижують поріг перколяції. Щоб вивчити вплив форми частинок на поріг перколяції та властивості електропровідності, Кай припустив, що як електричні властивості частинок, так і матриця є ізотропними, а композити випадково орієнтовані в еліпсоїдних частинках [14]. Використовуючи це припущення, Кай виявив, що використання наповнювача з вищим співвідношенням сторін допомагає зменшити мінімальний вміст наповнювача, необхідне для досягнення порогу перколяції [14]. Тим часом використання найбільш провідних частинок наповнювача не підвищує ефективну провідність композиту, що називається явищем насичення. Ван пояснив вплив напруги зсуву на орієнтацію наповнювача використанням скловолокна, де скловолокно орієнтується паралельно напрямку потоку в перехідному шарі, особливо коли напруга зсуву прикладається до зразків динамічного зсуву [39]. Зразки динамічного зсуву з наповнювачами з високою орієнтацією мають вищу міцність на розрив при низьких навантаженнях волокон, але стають меншими при більших навантаженнях наповнювачів через розрив волокон, спричинений більшою прикладеною силою зсуву. Це пояснює скловолокно довжиною 10 мм, довжина якого пізніше зменшилася до 1 мм під час процесу екструзії. Ван також пояснив, що більший розрив у довгому скловолокні з вищою напругою зсуву призведе до зниження механічних характеристик композитного матеріалу, який важко досягти компромісу через зниження міцності. Подібне спостереження зробив Копплмайр, який пояснив вплив напруги зсуву на орієнтацію наповнювача [44]. Експеримент проводився з використанням двох різних швидкостей зсуву $0,1 \text{ c}^{-1}$ протягом 60 хв та $0,01 \text{ c}^{-1}$ протягом 10 хв, де зразки зазнали швидкості зсуву $0,1 \text{ c}^{-1}$, паралельно орієнтовані до напрямку головки екструдера з більшим пошкодженням зразків перед зсувом. Таким чином, обидва мають сильний зв'язок, але нижча в'язкість

при зсуві призводить до підвищених рівнів попереднього зсуву. Шляхом розміщення розривної пластини між екструдером і матрицею для вирівнювання наповнювачів у потрібному напрямку, що сприяло досягненню 85% очікуваного значення ідеального вирівнювання [45]. Збільшення сили зсуву може бути спричинене більшою кількістю наповнювача, доданого під час виробничого процесу, що покращує вирівнювання наповнювача та одночасно підвищує електропровідність [42, 43].

Проте Тайпалус повідомив, що довше вуглецеве волокно знизить поріг перколяції, таким чином підвищить електричну перколяцію композитного матеріалу [40]. Як правило, більшість композитів мають різні фізичні властивості залежно від розмірності наповнювача. У порогових значеннях перколяції критична об'ємна частка провідного наповнювача залежить лише від співвідношення розмірів наповнювача [12]. Вуглецеве волокно, вуглецеві нанотрубки і графен мають значну анізотропію розмірів, що є результатом композитів з низькими порогами перколяції [17]. Орієнтація наповнювача значною мірою залежить від розміру наповнювача, форми та співвідношення сторін. Через різні розміри використовуваних частинок графіту важче створити аналітичну модель, яка представляє експериментальні дані. Таким чином, Двейрі проаналізував кожен розмір частинок графіту за допомогою комп'ютерного моделювання [10]. Двейрі та Какаті резюмували, що частинки графіту розміром від 40 нм до 150 нм показали найвищу електропровідність під час оптимізованого процесу стиснення [10, 18]. Оптимізація розміру частинок забезпечить хорошу дисперсію та орієнтацію ізоляційних матеріалів, таким чином покращуючи провідну мережу між частинками. Тан пояснив, що візерунок орієнтації виникає в результаті процесу екструзії, щоб чітко визначити орієнтацію наповнювача [41]. Розріз уздовж напрямку екструзії зазвичай показує більш довгі сегменти волокнистого наповнювача порівняно з розрізом, зробленим перпендикулярно напрямку екструзії, де видно плями

волокнистих наповнювачів. Таким чином, якщо мікрофотографія вказує на те, що обидва напрямки здаються схожими, то, ймовірно, це брак орієнтації.

Орієнтація є одним із важливих параметрів, оскільки вона може змінювати механічні та електричні характеристики провідність електропровідного полімерного композитного матеріалу. Раніше дослідники повідомляли, що лише кілька моделей враховували параметр орієнтації при обчисленні електропровідності.

У 1995 році Хайн запропонував «псевдоафінну» модель деформації, щоб передбачити ефект орієнтації полімерного кристала з використанням затверділого матеріалу [45]. Хайну вдалося орієнтувати коротке скловолокно через дві конвергентні зони, запровадивши процес попередньої орієнтації та розмістивши розривну пластину в стовбурі екструдера, щоб забезпечити найвищий ступінь вирівнювання волокон. Як правило, матеріали, які проходять процес екструзії, зазнають подовження та деформації зсуву від прикладеної сили зсуву. Хайн довів, що екструзія з розплавом здатна забезпечити високий ступінь вирівнювання волокон. У своєму рівнянні моделювання Хайн врахував коефіцієнт деформації λ , отриманий у процесі екструзії твердого тіла, щоб обчислити кути орієнтації. Однак модель, яку використав Хайн, вивчала лише вплив орієнтації на механічні характеристики твердотілого деформованого матеріалу.

Як пояснив Люкс, структурно-орієнтована модель включає параметр орієнтації в моделюванні рівняння електропровідності [20]. У 1997 році Вебер і Камал запропонували структурно-орієнтовану модель, яка враховує концентрацію наповнювача, розмір, співвідношення сторін і орієнтацію. Клінгерман використовував цю модель волоконного контакту (FCM) Вебера і Камала для вимірювання електропровідності орієнтованих наповнювачів у композиті [46]. Клінгерман використовував вуглецеві волокна у своїх дослідженнях, де співвідношення сторін наповнювача є основним фактором, що впливає на характеристики електропровідності. Однак, здається, що FCM

важко виміряти експериментально, оскільки для цього потрібні розрахунки на основі експериментальних даних, тоді як між експериментальними і теоретичними розрахунками існує погана кореляція.

Пізніше Тайпалус модифікував модель волоконного контакту, зменшивши кількість використовуваних параметрів [40]. Електропровідність композитного матеріалу розраховують, враховуючи об'ємну фракцію, діаметр наповнювача, провідність наповнювача і кількість контактів між наповнювачами в параметрах моделювання. Тайпалус виявив зв'язок фактора X , який залежить від кількості контактів волокон, m . У модифікованій моделі передбачається, що контакт волокон не є абсолютно безперервним, а має тип контакту "кінець в кінець" або "тіло в тіло", як на рис. 2. Ці типи контакту дають основний вплив на електричну провідність, оскільки неідеальний контакт мінімізує всю провідність композиту.

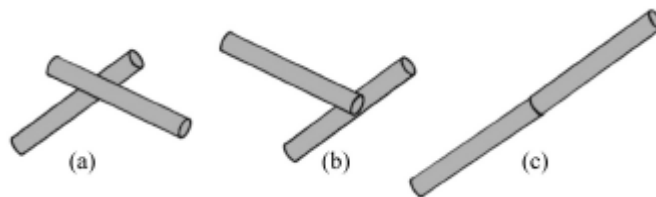


Рисунок 2. - Схема трьох різних моделей контакту між волокнами: (a) тіло до тіла; (b) від тіла до кінця; (c) наскрізний.

Ця модифікована модель також припускає, що тонкий контакт розділений шаром. Більше того, провідність контакту зростає зі зменшенням зазору між шарами, як показано на рис. 3.

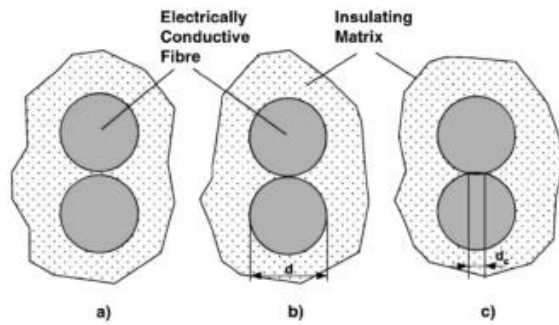


Рисунок 3. - Схема трьох різних типів контактних ділянок волокон: (а) волокна розділені тонким шаром матриці; (b) волокна мають контакт в одній точці; і (c) волокна мають плоске коло контакту [40].

Деталі модельного рівняння були пояснені Тайпалусом і Тахеріаном у їхніх роботах [11, 40]. Як і попередня модель волоконного контакту, модифікована модель волоконного контакту також має ті ж обмеження в прогнозуванні впливу поверхневої енергії, яку важко виміряти експериментально. Також згадується, що мережеві структури матриці, які, як передбачається, перекриваються, призводять до ще більших труднощів. Використання термопласту як ізоляційного матеріалу модифікувало модель волоконного контакту Вебера і Камала для прогнозування електропровідності матриці [40]. На відміну від попередньої моделі волоконного контакту, припускається, що модель не перебуває в ідеальному контакті, а контактує або кінець з кінцем, або тіло з тілом. Для частинок з плоским колом контакту провідність зростатиме зі зменшенням проміжку між тонкими шарами матриці. Таким чином, ці загальні площі контакту впливатимуть на всю провідність композиту. Ця модифікована модель тонкого контакту базується на об'ємній частці для розрахунку електропровідності полімерного композиту. Однак тільки об'ємна частка волокна, яка бере участь у формуванні електричної мережі, впливає на електропровідність тоді як інші волокна в оточуючій полімерній матриці не покращують електропровідність. Вони перевірили достовірність цих

моделей, використовуючи поліпропілен і вуглецеве волокно, що згодом показало хорошу узгодженість між прогнозованими і експериментальними результатами. Наповнювачі з вуглецевого волокна були прийняті як основна мережа, яка збільшує шляхи провідності.

Розробка моделей важлива для прогнозування електропровідних властивостей ЕПК. Модель загального ефективного середовища (General Effective Media, GEM) є найкращою моделлю, яка використовується в даний час, оскільки вона здатна передбачити електропровідність для систем з декількома наповнювачами при високих навантаженнях на наповнювач. Виходячи з вищевикладеного, орієнтація є найважливішим фактором для оптимізації електропровідних і механічних характеристик, який може бути викликаний кількома методами, такими як напруга зсуву, зміна співвідношення сторін матриці і наповнювача залежно від потреб. Модифікована модель волоконного контакту (FCM) є найновішою моделлю, яка враховує фактор орієнтації при прогнозуванні провідності з гарним узгодженням між експериментальними результатами і модельним прогнозом. Експериментальні спостереження дозволяють зробити висновок, що паралельна орієнтація волокон до напрямку екструзійної головки забезпечує кращу електропровідність порівняно з випадково орієнтованими наповнювачами.

1.3 Застосування електропровідних полімерних композитів

Електропровідні полімерні композити мають важливе застосування в багатьох областях, таких як антистатичні матеріали, матеріали для захисту від електромагнітних перешкод (ЕМП) і провідники [48]. Відомо, що електропровідність таких матеріалів сильно залежить від структури та кількості провідних мереж. Тому незначна зміна провідних мереж викликає значну зміну провідності. Використовуючи «чутливу до стимулів» поведінку

провідних мереж, електропровідні полімерні композити можна використовувати як інтелектуальні датчики для моніторингу [49–56] або виявлення змін у зовнішніх полях, таких як датчик деформації [57–65], датчик тиску [66–72], датчик пари [73–82], датчик рідини [83–92], і датчик температури [93–102]. Порівняно з традиційними датчиками, виготовленими з металу, напівпровідників або кераміки, датчики на основі електропровідних полімерних композитних матеріалів демонструють різноманітні переваги, такі як легка вага, стійкість до корозії, легка обробка та налаштування, продуктивність. Одним з важливих напрямків застосування електропровідних полімерних композитів є нагрівальні елементи.

1.4 Типи та загальні характеристики нагрівальних елементів

Нагрівачі, які містять провідні шари та підкладки, виділяють тепло, коли через них протікає струм завдяки ефекту Джоуля. Нагрівачі широко використовуються в нашому повсякденному житті та привертають значну увагу до розробки наступного покоління обігрівачів через зростаючий попит на електроніку, що деформується. [103-107] Технологічний розвиток відкриває перед нами безмежні можливості електроніки, що деформується, що значно перевищує те, що можливо зі звичайною електронікою. [108-114] Обігрівачі, застосовують як пристрої для запобігання обмерзанню [115-119], пристрої керування температурою [120-124], у охороні здоров'я [125-128], як переносні датчики [129-131] тощо. Наприклад, обігрівачі можуть забезпечувати тепло необхідне для збільшення робочої температури рідкокристалічних дисплеїв (РК) у холодному середовищі або використовуватись для систем проти запотівання, захисту від зледеніння, оптики чи оптичних дисплеїв [132-133]. Звичайні жорсткі нагрівачі зазвичай використовують напівпровідникові або металеві матеріали як нагрівальні елементи, які демонструють стабільну та високу продуктивність. Наприклад, Рао та його колеги [134] виготовили

прозорий нагрівач шляхом фізичного осадження Au на кварцову підкладку та використання акрилової смоли як шаблону для тріщин. Це прозорий провідник із низьким опором пластини $5,4 \Omega \text{ sq}^{-1}$ і високотемпературним нагрівачем, який може досягати $\approx 600 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 38 с, прикладаючи напругу 15 В. Однак нагрівач обмежений у багатьох застосуваннях портативні потреби, такі як виявлення руху людини, переносна електроніка тощо, через товсту кварцову підкладку. Звичайні нагрівачі завжди складаються з нагрівального елемента та жорсткої підкладки, а принцип роботи електропровідних нагрівачів базується на ефекті Джоуля та тепловому розподілі. Однак тверда основа за своєю суттю обмежує застосування звичайних нагрівачів [135]. Гнучкі та розтяжні нагрівачі привертають величезну увагу завдяки розвитку гнучкої електроніки [136-138]. Гнучкі нагрівачі можуть адаптуватися до помірної деформації, наприклад згинання та скручування [139, 140]. А розтяжні нагрівачі мають більше сценаріїв застосування завдяки своїм механічним властивостям [141, 142]. В останні роки нагрівачі що добре деформуються набули швидкого розвитку завдяки широкому діапазону деформацій, хорошій повторюваності та низькій щільності [143]. Одна з найвагоміших переваг таких нагрівачів – це їх здатність до деформації, що призводить до чудової адаптованості до об'єктів різних форм і розмірів. Наприклад, вони можуть легко пристосовуватися до різних форм, таких як однорідний циліндр або нерівний циліндр. Тим не менш, гнучкі обігрівачі можуть адаптуватися до знімних суглобів людини. Крім того, гнучкі нагрівачі з індивідуальними конструкціями можна зібрати в рулон, що економить простір і зменшує витрати на зберігання. З іншого боку, ефективне використання простору та легка мобільність є вирішальними для критичних випадків, які потребують економії місця.

Опалювальне обладнання зазвичай має багато складних сценаріїв застосування, таких як обігрів неправильної форми та робота з іншими електронними пристроями. Традиційне опалювальне обладнання не може адаптуватися до різних суглобів людського тіла через їхню жорсткість.

Однак гнучкі нагрівачі можна адаптувати до зовнішнього вигляду різних пристроїв і максимально налаштувати машину для досягнення рівномірного нагріву. Тому велика увага приділяється гнучким нагрівачам для майбутніх потреб в обігрівачах наступного покоління. З іншого боку, обігрівачі повинні підтримувати стабільний опір, щоб забезпечити тривалий термін служби та уникнути виходу з ладу переносної електроніки. Як наслідок, обігрівачі повинні бути деформованими, адаптованими та зручними зі стабільністю опору.

Нагрівальні тонкоплівкові пристрої, засновані на ефекті Джоуля, сьогодні широко використовуються в різних галузях електроніки та мікроелектроніки.[144, 145] Вони зазвичай виготовляються з металевих матеріалів і напівпровідників, таких як мідь, алюміній або сплави. У електричному нагрівальному пристрої стабільна температура досягається шляхом контролю Джоулевого нагрівання провідника, і залежно від опору його листа, потужність розсіюється як тепло. Металеві матеріали зазвичай мають високу електропровідність і теплопровідність. Голан і його колеги [146-148] продемонстрували тонкоплівковий нагрівач з використанням шарів сплаву Al і Ni–Cr. Вони інтегрували цей нагрівач із вбудованою термопарою, яка допомагає регулювати потреби в необхідній тепловій потужності. Температура нагрівача може досягати сталої температури 140 °C при вихідній потужності 6 Вт. Крім того, традиційні нагрівачі можуть витримувати більш високу прикладену напругу та мати постійну температуру завдяки своїм металевим нагрівальним елементам і властивостям підкладок. Chung і його співробітники [149] представили характеристики мікронагрівачів із тонкими плівками MgO, які використовуються як середній шар між тонкими плівками Pt і кремнієм на ізоляторі (SOI). Втрати тепла через провідність були зменшені шляхом формування канавки на краю мембрани, яка значною мірою запобігає втратам тепла. Таким чином, найкраща температура нагріву понад 580 °C спостерігалася при прикладеній потужності 0,9 Вт. Традиційні обігрівачі

привносять у наше життя багато зручностей завдяки високій ефективності нагріву. Вони відіграють важливу роль у збереженні тепла. Однак є деякі внутрішні недоліки. Одним з найбільш істотних недоліків є їх висока щільність і не здатність до великих деформацій, що обмежує сценарії застосування. Крім того, їх нагрівальні характеристики з часом можуть змінитись, оскільки деякі металеві нагрівальні елементи легко окислюються на повітрі.

З розвитком електроніки у людей зросли вимоги до нагрівальних приладів. У порівнянні з традиційними жорсткими нагрівачами гнучкі нагрівачі здатні до помірних деформацій, як згинання, скручування тощо.[150-153] Гнучкі підкладки, такі як поліетилентерефталат (PET), поліімід (PI), як правило, використовуються як опорні шари для жорстких нагрівальних елементів [154-156] Kang et al. [157]. Гнучкі та прозорі нагрівачі на основі графену; плівки, синтезовані шляхом хімічного осадження з парової фази на Si фольгу. Ці гнучкі нагрівачі демонструють низький опір листів $\approx 43 \Omega \text{ sq}^{-1}$ з приблизно 89% оптичним пропусканням. Продуктивність нагрівача була дуже стабільною при розтягуванні до 4% або згинанні 1000 разів із натягом 1,1%. Парк та інші.[158] продемонструвати надійний і простий процес виготовлення металоподібного 2D MXene тонкого нагрівача (TFH). Вони використовували електростатичне складання негативно заряджених MXene на позитивно обробленій підкладці PET. Тонкий нагрівач MXene може згинатися майже до 180° завдяки еластичній підкладці з ПЕТ, що значно розширює діапазон застосування. Існує два відомі способи створення гнучких нагрівачів: перенесення провідного шару на гнучку підкладку або комбінування провідних нагрівачів з еластомером [162]. Наприклад, Jiang et al.[158] змішали оброблене срібло і PDMS у масовому співвідношенні 3:1 для отримання електропровідних композитів (ЕСС) і надрукували ЕСС на підкладці PVA за допомогою простого трафаретного друку. Трафаретний друк — це традиційний метод друку, який базується на нанесенні чорнила з електропровідних матеріалів на еластомерну підкладку та має переваги

високої точності обробки, яка може забезпечити рівномірну товщину плівки та високу ефективність обробки, на яку не впливатимуть особисті операції. Шар EGC виготовляється шляхом змішування обробленого срібла і PDMS у масовому співвідношенні 3:1. Гнучкі нагрівачі можуть досягати стабільної температури 203 °C при дуже низькій напрузі 2 В. В іншому прикладі нагрівачі на основі силіконової гуми були виготовлені екструзією силіконової гуми з технічним вуглецем (СВ) і титаном, покритим SnO₂/Sb. діоксид (TiO₂). [163] Термостабільність достатньо хороша для того, щоб відтворюваність нагрівачів була досліджена шляхом застосування напруги змінного струму 220 В.

Гнучкі нагрівачі можуть зазнавати лише обмеженого згинання або скручування. Але нагрівач повинен витримувати більші навантаження в багатьох практичних застосуваннях, які потребують відмінної розтяжності. Наприклад, із розвитком медичних пристроїв медичний обігрівач іноді потребує легшого та значного навантаження для лікування різних частин людського тіла. В одному випадку фрактальні дендрити срібла були нанесені на термопластичні тонкі плівки за допомогою трансферного друку для отримання візерункових розтяжних нагрівачів.[164] Трансферний друк широко використовується у виготовленні плівок, зазвичай перенесення провідних шарів на еластомерну підкладку. Провідний шар може мати високу провідність завдяки тому, що його можна точно спроектувати. Обігрівач представляє високу розтяжність 500% і низьковольтні (0–4 В). Температура нагрівачів знизилася з 52,3 до 38,5 °C, коли деформація зростає від 0% до 200%, що вказує на чудовий потенціал для досягнення термічної стабільності при величезній деформації. В іншому прикладі внутрішню крихкість і низьку термічну стабільність протеїну шовку було покращено шляхом додавання поліуретану в регенований шовковий мозок [165]. Мережі металевих наноберців були побудовані з обох сторін композиційних мембран із шовкового матеріалу (SFCM), щоб функціонувати як індикатори температури та нагрівальні компоненти. Коли

SFCM були розтягнуті до 75%, температура нагрівання дещо знизилася ($\Delta T/T_0 \approx 10\%$), з рівномірним розподілом температури.

Деформівні нагрівачі, визначені як нагрівачі, що адаптуються до різних умов деформації та можуть підтримувати стабільний опір під час деформації одночасно, будуть універсально застосовуватися в нашому майбутньому житті. Деформівні обігрівачі мають різні конструкції, включаючи багатошарову структуру, перламутрову структуру, тканинну структуру та структуру кірігамі. Huang et al. [165]. представили білкову електронну шкіру (PBES), що складається з багатьох шарів, таких як нагрівальний шар, друкувальний електрод, датчик температури та еластомерна підкладка. Деформований нагрівач має чудову стабільність при нагріванні, щоб протистояти великим навантаженням. Ван і його колеги [166] розробили унікальну структуру нанолистів, схожу на перламутр, за допомогою простої техніки нанесення покриття. Електричні властивості залишаються стабільними під час циклів згинання в низькому діапазоні деформації (менше 50%). Ма та його співробітники [167] запропонували нову стратегію для виготовлення деформівних нагрівачів. Їхня відносна зміна опору була стабільною при розтягуванні до 200% деформації за допомогою мотузок і трикотажних тканин. Jang та інші [168] виготовлені високоефективні обігрівачі на основі структури кірігамі. І ці нагрівачі демонструють хорошу розтяжність (більше 400%), зберігаючи при цьому свою стабільну продуктивність нагріву.

Принцип і матеріали нагрівачів. Принцип роботи нагрівачів. Принцип роботи електропровідних обігрівачів заснований на ефекті Джоуля, який експериментально підтвердив Джеймс Прескотт Джоуль. Він припустив, що коли електричний струм I проходить через однорідний провідний матеріал з електричним опором R , кількість тепла, що виділяється, дорівнює I^2R за одиницю часу. Відомо, що втрати тепла відповідають загальній теплопередачі від нагрівачів і пов'язані з трьома основними фізичними процесами: 1) теплопровідність до підкладки або через будь-які провідні з'єднання, 2)

конвекція до навколишнього повітря, 3) випромінювання від гарячих поверхонь. Основними нагрівальними елементами зазвичай є металеві матеріали, такі як мідь, стійка до окислення сталь тощо. Традиційні електричні нагрівачі, як правило, виготовляються з металевих матеріалів як нагрівальних матеріалів і кераміки як підкладки.[169]. Традиційні обігрівачі мають багато переваг, таких як низька вартість, висока ефективність нагрівання, хороша оброблюваність тощо. Однак, притаманна їм жорсткість призводить до негнучкості характеристик. Деякі з керамічних обігрівачів важко встановити на вигнутих поверхнях, і вони крихкі. Гнучкі нагрівачі привернули значну увагу, оскільки вони можуть протистояти певному ступеню деформації, наприклад згинання, скручування або кочення. Більш важливо те, що гнучкі нагрівачі все ще можуть підтримувати адекватну продуктивність нагріву за помірної деформації, включаючи згинання, скручування або кочення. Тонкі полімерні плівки або листи використовуються як опорний шар для нагрівачів, таких як поліетилентерефталат (PET) [60, 63], поліімід (PI) [150] тощо. Наприклад, Qiu et al. [178] представили високоефективну інфрачервону радіаційну нагрівальну тканину, що складається з двох шарів ПЕТ-тканини та шару вуглецевих нановолокон. Сконструйована тканина має чудову гнучкість, хорошу термічну стабільність і високий коефіцієнт електротермічної конверсії до 78,99%. Виготовлена сендвіч-структурована тканина відкриває нові можливості для розробки гнучких нагрівальних тканин. Є кілька варіантів нагрівальних елементів, які можна використовувати на гнучких підкладках. Сюди входять провідні матеріали на основі вуглецю (технічний вуглець, вуглецеві нанотрубки та графен), провідні матеріали на основі металу (наночастинки металу, металеві нанодропи), провідні полімери (полі(3,4-етилendioкситіофен)-полістиролсульфонат (PEDOT: PSS)), поліанілін (ПАНІ)). Хоча гнучкі обігрівачі легші та гнучкіші, ніж традиційні обігрівачі, їх неможливо розтягнути значною мірою, що може суттєво обмежити застосування та розробку гнучких обігрівачів. Для досягнення розтяжності в

електроніці використовуються дві стратегії: структурний дизайн та інноваційні матеріали. Було детально розглянуто нові стратегії структурного дизайну, включаючи хвилі/зморшки [187], текстиль, [183] структуру пряжок, [178] структуру кірігамі [177] тощо. Розтяжні нагрівачі можуть витримувати значні навантаження, ніж гнучкі нагрівачі завдяки до попередніх деформацій, розроблених у структурі нагрівальних елементів. З іншого боку, деякі еластичні матеріали, такі як полідиметилсилоксан (PDMS) і термопластичні поліуретани (TPU), також використовуються для проектування та виробництва обігрівачів. У порівнянні з еластичними нагрівачами, розтяжні нагрівачі можуть пружно деформуватися, що істотно розширює сферу їх застосування. Нагрівачі, що розтягуються, можуть адаптуватися до значної напруги (до 60%), зберігаючи при цьому відмінні характеристики нагріву. Однак нагрівачі, що розтягуються, навряд чи можуть підтримувати стабільну температуру в широкому діапазоні прикладеної деформації, оскільки їх провідна мережа зазвичай змінюється з деформацією. З розвитком штучного інтелекту та інтернету сценарії застосування переносної електроніки стануть більш різноманітними, і з'являться більш високі вимоги до обігрівачів, які мають бути деформованими, портативними та адаптуватися до різних форм або розміри. Як новий тип м'якої електроніки, деформовані нагрівачі відіграватимуть значну роль у майбутньому. Він може адаптуватися до неправильних форм із вигнутою поверхнею та підтримувати стабільну продуктивність нагріву. Крім того, його можна деформувати та переносити всередину невеликого об'єкта, щоб заощадити місце та бути портативним. Завдяки своїй здатності до деформації вони мають переваги носіння, і їх легко адаптувати до деформації, такої як деформація повітряної кулі під час входу. Більше того, деформівні нагрівачі забезпечать відмінну температурну стабільність і широкий діапазон деформацій завдяки своїй унікальній конструкції. Як наслідок, деформівні обігрівачі будуть застосовуватися

повсюдно завдяки їхнім відмінним характеристикам і нададуть нові можливості для більш комфортного життя у майбутньому.

Вирішальним моментом для обігрівачів є вибір провідних матеріалів, які використовуються при виготовленні, щоб поєднати теплові характеристики з низьким енергоспоживанням, бажаними механічними властивостями, безпекою та довгостроковою повторюваністю для кінцевих застосувань обігріву. Розробка електропровідних матеріалів має важливе значення для електронагрівачів через їхні унікальні електронні, термічні та механічні властивості. Використовуються різні матеріали, включаючи металеві або сплавні мікродроти, наноматеріали на основі вуглецю, провідні полімери, провідні оксиди металів і нанокompозити, а також гібридні провідні матеріали. Вони мають широкий діапазон фізичних властивостей (електропровідність, теплопровідність), що дозволяє використовувати їх як будівельні блоки для обігрівачів з різними функціями. Завдяки розробці властивостей провідного матеріалу, низькій робочій напрузі, швидкому відгуку, хороша повторюваність може бути реалізована для обігрівачів наступного покоління.

Дроти з чистого металу, такі як мідні дроти, мають чудову електропровідність, але вони майже не використовуються як нагрівальні елементи через окиснення міді. Чисті металеві дроти надзвичайно легко окислюються при високій температурі. Мікродроти зі сплавів є основними нагрівальними матеріалами, які використовуються в більшості промислових і побутових систем опалення, що вимагають високих температур [188].

Перевага цих систем полягає в тому, що вони можуть бути легко включені в ткани або трикотажні текстильні матеріали для текстильного застосування завдяки гнучкості та безперервності дротів. Такі тонкі елементи мають низьку теплову інерцію, тому вони швидко нагріваються і їх можна термостатично контролювати. Важкі дроти в оболонці можна розподілити та прикріпити до внутрішньої підкладки одягу, наприклад жилетів, подібно до тих, які є в електропровідних ковдрах. Електричні

нагрівальні дроти також можуть бути вбудовані в гнучку структуру пластику та можуть бути безперервно подовжені, утворюючи ряд петель нагрівального дроту, які потім можуть бути сформовані у складні форми рукавичок, шкарпеток, ковдр та жилетів. На ринку є два основних типи електронагрівальних сплавів, які в основному використовуються для печі. Ni-Cr був розроблений наприкінці минулого століття і незабаром використовувався як матеріал для нагрівальних елементів у промислових печах і електропровідних побутових приладах.[279] Пізніше був розроблений новий нагрівальний сплав залізо-хром-алюміній (FeCrAl), названий кантал. Він продемонстрував довший термін служби та вищу максимальну робочу температуру (1400 °C), ніж NiCr (1200 °C). Ці два типи сплавів мають свої специфічні властивості, переваги та недоліки і поставляються в багатьох різних формах. Загалом FeCrAl перевершує NiCr щодо продуктивності та терміну служби, і тому є загальним вибором матеріалу для металевих нагрівальних елементів для промислових печей. Користувач печі використовує FeCrAl, що дає менше матеріалу за нижчою ціною та довший термін служби. Ця менша вага елемента FeCrAl також призведе до значної економії витрат на опорну систему, оскільки потрібно менше підвісних гаків. Сплав NiCr може мати унікальні переваги, якщо потрібен нагрівальний елемент з відмінними механічними властивостями в гарячому стані. FeCrAl, однак, має знижену міцність при підвищених температурах на тому ж рівні, що й NiCr. Крім того, останнім часом багато зацікавленості викликали металеві наноматеріали, у тому числі Au нанодроти [137], Ag нанодроти [166], Pt наноберти [196] тощо, наприклад, Рао та ін. al. нанесли Au на тріснутий комерційний акриловий шаблон за допомогою фізичного осадження з парової фази, яке ми обговорювали раніше. Таким чином, вибір металів і сплавів як нагрівальних елементів слід здійснювати з урахуванням температури, очікуваного терміну служби, окислення, можливої корозії та найвищої вартості.

Наноматеріали на основі вуглецю. Вуглецеві волокна, вуглецеві нанотрубки та похідні графену були широко описані в літературі щодо кількох сфер застосування, включаючи видалення запотівання, видалення зледеніння, термохромні дисплеї, переносну електроніку та деформівні нагрівачі. У порівнянні з металевими наноматеріалами, наноматеріали на основі вуглецю демонструють легкість, гнучкість та інші чудові механічні властивості. А вуглецеві нагрівачі демонструють швидший і ефективний нагрів, рівномірний розподіл температури та високу прозорість. Гнучкі нагрівачі на основі вуглецю можуть адаптуватися до різних підходів до процесу, таких як розпилення [197], занурення [198], електропрядіння [162], хімічне осадження з парової фази (CVD) тощо. Покриття зануренням мають мінімальні вимоги до точності обладнання та широко використовуються в гнучких обігрівачах. SWCNT широко використовуються завдяки своїм чудовим механічним властивостям, легкій вазі та стабільності. Електропрядіння — це метод обробки для виробництва нагрівачів на основі нановолокон. Цю та ін.[162] продемонстрували гнучку та структуровану сендвіч-структуру нагрівальної тканини, яка використовує мембрану з вуглецевих нановолокон як провідний матеріал. Мембрана з вуглецевого нановолокон була виготовлена з розчину поліакрилонітрилу (PAN) шляхом електроформування та карбонізації. Нагрівальна тканина показала чудову ефективність електротермічного перетворення до 78,99%. Деякі нові методи також використовуються для виготовлення високоякісних листів графену з чудовою електронною та теплопровідністю, наприклад, метод електрохімічного виготовлення. Для виробництва високоякісних графенових листів Тіан [160] повідомив про новий електрохімічний метод шляхом змішування перекису водню та щавлевої кислоти як електроліту. Відшарований графен має рівномірний бік, низький вміст кисню та надвисоку провідність. Більше того, електротермічний нагрівач на паперовій основі демонструє чудові електротермічні характеристики з коротким часом нагрівання протягом 30 с після покриття

висококонцентрованим графеновим чорнилом (8,5 мг/мл). Більше того, у деформівних нагрівачах на основі вуглецю механічна стабільність порушується, якщо хтось має намір досягти високої електропровідності для високої продуктивності нагріву. Одним словом, є ще деякі проблеми, які чекають свого вирішення в майбутньому.

Провідні полімери мають легко регульовані електричні, механічні та оптичні властивості, що робить їх хорошими кандидатами для електронних пристроїв, таких як сенсорні панелі, світловипромінювальні діоди, термопристрої, електричні елементи, датчики, виконавчі механізми як електричні нагрівачі [200]. Полі(3,4 етилендіокситіофен)/полі(стиролсульфонат) є одним із найуспішніших електропровідних полімерів [204]. Великі зусилля спрямовані на покращення електропровідності PEDOT/PSS було продемонстровано, може бути налаштована в широкому діапазоні від 0,1 до 4380 См*см⁻¹ за допомогою різних методів обробки [206]. Окремо регульованої провідності, провідний полімер має такі переваги, як гнучкість, недорогі виробничі процеси, такі як друк розчину, безпечне поводження та доступність великомасштабного виробництва.[210] Ці переваги створюють чудові можливості для деформуючих нагрівачів. Наприклад, текстильні вироби з електропровідним полімерним покриттям без шкоди для гнучкості непровідних текстильних виробів. Загальні методи функціоналізації непровідних полімерів або текстилю з електропровідними полімерами - це полімеризація на місці та техніці покриття або друку [213]. Наприклад, Хіе та ін.[213] повідомили про високоефективний накопичувальний пристрій шляхом нанесення полі(піролу) на комерційний поліефірний склоочисник чистого застосування шляхом простої полімеризації на місці. Текстиль мав хорошу провідність завдяки покриттю з електрополімерних провідних матеріалів, що демонструє недорогий спосіб виготовлення гнучких нагрівачів. В іншому випадку Zhang et al.[188] покриттям PEDOT на текстильних виробах за допомогою парофазної полімеризації EDOT у камері з нержавіючої сталі.

Покриваючи провідні матеріали на основі полімерів, широко доступні тканини були перетворені на легкі текстильні електроди, що не містять металу, які можна носити, які можна вирізати або вплітати в легкі тканинні нагрівачі.

Нагрівачі, що можуть деформуватись, привернули багато уваги в дослідженнях і промисловості протягом останніх років, при цьому все більше уваги приділяють гібридам і нанокompозитам [226]. Узгодження матеріалів із вимогами до таких нагрівачів є перспективним, оскільки вони поєднують переваги кожного матеріалу та, як правило, забезпечують набагато кращі характеристики, ніж ті, що складаються з одного типу матеріалу. Іншими словами, одному провідному наноматеріалу складно задовольнити всі промислові вимоги, тоді як комбінація кількох цих наноматеріалів може ефективно підвищити продуктивність деформованих нагрівачів. Hwang і його колеги [173] представили високоефективні прозорі плівкові нагрівачі з чудовою еластичністю та термічною стабільністю на основі сендвіч-структури, яка поєднує провідні матеріали на основі металу та провідні матеріали на основі вуглецю. Провідний шар містить срібні нанодропи (Ag NWs) і одностінні вуглецеві нанотрубки (SWCNTs). Провідність нагрівачів суттєво зменшилася, коли невелика кількість 0,025 мас.% SWCNT була з'єднана з мережами Ag NW. Існують різні комбінації провідних матеріалів, зокрема провідні матеріали на основі металу та вуглецю, провідні матеріали на основі металу та металу, провідні матеріали на основі металу оксиди металів, провідні матеріали тощо. Наприклад, Лай та ін. [227] повідомили про покриття гібридів міді/відновленого оксиду графену (Cu/RGO) на поверхні полі(п-фенілен бензобісоксазолу) (PBO). Шляхом модифікації PBO полі(дофаміном) після активації RGO та безгальванічного міднення було отримано PBO з мідним покриттям (Cu/RGO-PBO) продемонстрував низький електричний опір $0,16 \text{ Ом} \cdot \text{см}^{-1}$ через покриття з металевого матеріалу. Однією з переваг вуглецевих матеріалів є їх стабільна структура та добрі механічні властивості. Ан і його колеги [228] повідомили про вдосконалений метод нанесення

розпалюваного покриття для виготовлення нагрівачів з малюнком на комерційних тканинах. Комбінація CNT та Ag NW, комерційні тканини представляють стабільну структуру та низький листовий опір $22 \Omega \cdot \text{кв}^{-1}$ і показують відмінну розтяжність 50%. Більше того, металеві наночастинки також можуть значно покращити теплопровідність деформованих нагрівачів. Наприклад, Ім і його колеги[229] продемонстрували, що теплоефективність листів CNT значно зросла з 27,3 до 99,9 $^{\circ}\text{Ccm}^2\text{Вт}^{-1}$, коли гранульований паладій (Pd) був доданий до окремо стоячого листа CNT. А лист CNT/Pd стабільно зберігає свої початкові характеристики навіть після 300 циклів імпульсів напруги. Нові гібриди/наноккомпозити на основі провідних наноматеріалів надають нові можливості для переносних пристроїв, виготовлених за допомогою недорогих і масштабованих процесів. І вони створюють широку різноманітність сучасних застосувань, футуристичних форм і повсякденного використання. Більше того, ці наноматеріали можуть бути успішно інтегровані в пристрої, оскільки вони демонструють взаємодію між електричними та термічними властивостями, механічною стабільністю, прозорістю тощо. На завершення, кожен провідний матеріал має свої особливості та переваги у виготовленні деформованих матеріалів. Матеріали на основі металу та оксиди металів мають переваги високої провідності, але щільність металу зазвичай вища, ніж у інших провідних матеріалів. Нагрівачі, які використовують оксиди металів як провідні матеріали, зазвичай мають обмежену розтяжність. Переваги матеріалів на основі вуглецю полягають у тому, що він має гарну термічну стабільність, але його важко рівномірно розподілити. Електропровідні полімери легко обробляти, але теплопровідність провідних полімерів низька. У порівнянні з цими провідними матеріалами, гібридні провідні матеріали поєднують переваги кожного матеріалу та, як правило, забезпечують набагато кращі характеристики, ніж ті, що складаються з окремих провідних матеріалів.

Структурний дизайн. Конструкція має вирішальне значення для реалізації гнучких нагрівачів, які допомагають зберегти попередню деформацію в матеріалах. Ці структури деформуються в межах рівнів попередньої деформації, які застосовуються під час процесу виготовлення. Провідні матеріали, включаючи металеві матеріали, електропровідні полімери та вуглецеві наноматеріали, можуть поєднувати незалежні від деформації електричні властивості та адаптивні характеристики завдяки структурному дизайну. У цій частині представлено різні методи проектування структур як керівництво для виготовлення гнучких нагрівачів, включаючи текстиль, багатошаровість, хвилі/зморшки, острівні мости, орігамі та кірігамі, структуру ядро–оболонка тощо.

Одношарові обігрівачі є простими конструкціями, які можуть реалізовувати функції обігріву і, як правило, мають легкі та гнучкі переваги. Чанг і його колеги[237] продемонстрували гнучкий 3D-композитний нагрівач на основі паперу з графену (3DG)/карбонізованого PAN. Нагрівач на основі паперу був виготовлений простим процесом гарячого пресування та карбонізації. Він демонструє швидку електротермічну реакцію (до $213\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$ V^{-1}) і досягає $235\text{ }^{\circ}\text{C}$ за низької робочої напруги ($1,75\text{ V}$). Хуан та ін.[181] представив електрохімічну стратегію створення гнучких провідних вуглецевих пластин. Зморшкуватий вуглецева пластина має високу провідність 1000 См см^{-1} . Він є досить гнучким, щоб протистояти експерименту згортання та розгортання понад 1000 циклів. Крім того може досягати високої температури насичення ($423\text{ }^{\circ}\text{C}$) за низької робочої напруги (4 V).

Нагрівачі в кілька шарів, як правило, вважаються корисною та простою структурою, яку можна сформувати за допомогою різних методів процесу, таких як друк, [176] вакуумне формування, [161] покриття [190, 239]. Багатошарова структура допомагає подолати недоліки композитів, такі як низька провідність, єдина функція, складність переробки. Провідний шар може забезпечити високу провідність для композитних матеріалів. Подвійні

шари нагрівачів зазвичай містять шар провідного матеріалу та еластичний шар. Наприклад, Tian et al. підготував багатофункціональну електроніку з візерунками, наносячи фрактальні дендрити срібла на тонкий шар еластомеру за допомогою простого трафаретного друку та трансферного друку [166]. Walia та інші [238] представила прозорий нагрівач на основі Pd-дротяної мережі, що складається з акрилової смоли та металевого Pd. Цей двошаровий нагрівач може досягати 75 °C при 9 В. Пристрій поєднує в собі чудову чутливість (максимальний коефіцієнт вимірювання 659,5) і хорошу ефективність нагрівання (може досягати 52,3 °C при 1 В). Хонг і його колеги [172] перенесли AgNW на PDMS за допомогою простого вакуумного формування. Прозорі нагрівачі продемонстрували як широкий діапазон деформацій (до 50%), так і хорошу електропровідність (30 Ом кв⁻¹) (рис. 8с). Джанг і його колеги [196] виготовили прозорі електроди з використанням Ag нановолокон за допомогою електроформування та нанесення комерційної суспензії AgNWs на ПЕТ плівку для отримання гнучких нагрівачів. Обігрівачі підтримують стабільну температуру під навантаженням на 80%, і ними можна керувати бездротовим способом за допомогою смартфона.

Крім того, сендвіч-структура є ще однією важливою структурою для створення деформівних нагрівачів [244]. Однією з значних переваг є те, що металеві нанодропи та наночастинки металу легко окислюються та втрачають свою провідність із збільшенням часу використання, але сендвічна структура є корисним способом захисту провідної мережі нагрівачів.

Електропровідність — це здатність речовини або розчину проводити електричний струм у певній області. Це також один із найбільш фундаментальних і життєво важливих параметрів у системах обігріву.

Як правило, електропровідність нагрівального елемента можна регулювати в широкому діапазоні за допомогою різних провідних матеріалів або структурної інженерії. Наприклад, Ма та його колеги [176] виготовили надвисокопровідні розтягнуті волокна, використовуючи наночастинки срібла

у формі дужки з пелюстками у формі нанодиска та поліуретан шляхом мокрого прядіння. Провідність волокон, виготовлених із наночастинок Ag, становить $41\,245\text{ См см}^{-1}$, що в 100 разів більше, ніж у волокон, синтезованих за допомогою сферичних наночастинок Ag. І найбільш відповідна електропровідність сильно залежить від ситуації. Лі та його співробітники [142] перетворюють мікрочастинки рідкого металу в провідник, який сильно деформується, за допомогою процесу хімічного спікання. І вони вибірково змочують їх на мідних нанопластинах, присутніх у складі чорнила. Ефективна хімічна реакція надає провідним матеріалам практичну придатність нагрівача та низький поверхневий опір ($\approx 10\text{ м}\Omega\text{ кв}^{-1}$). З одного боку, питомий електричний опір нагрівального елемента не повинен бути занадто високим, оскільки високий питомий опір вимагає вищої напруги від джерела живлення, і в той же час вища напруга накладає більше навантаження на провідні матеріали, що може легко призвести до електричної несправності, якщо перевищувати максимальну щільність струму матеріалів. З іншого боку, електропровідність нагрівального матеріалу не може бути занадто великою, або опір, розподілений поза нагрівачем, потребує високої електричної потужності. Відповідно, обігрівач не може швидко прогрітися. Таким чином, вибір питомого електричного опору нагрівального елемента повинен бути зроблений в кожному конкретному випадку, який не може бути занадто високим або занадто низьким, а загальний діапазон становить $0\text{--}100\text{ Ом}\cdot\text{кв}^{-1}$.

Теплоємність і тепловідносність. Теплоємність і тепловіддача є двома найважливішими параметрами термодинаміки. І вони мають вирішальне значення для застосування обігрівачів. Теплоємність — це фізична величина, яка дорівнює відношенню тепла, доданого або віднятого від об'єкта, до результуючої зміни температури. Теплова потужність відображає здатність об'єкта зберігати енергію. Об'єкт з більшою теплоємністю може накопичувати більше теплової енергії, коли його температура підвищується до певного рівня. Іншими словами, температура об'єкта з вищою теплоємністю менш чутлива до

збільшення або втрати теплової енергії. Експериментальний результат показує, що тепла потужність нагрівальної тканини впливає лише на швидкість нагрівання/охолодження і не впливає на баланс між споживанням електроенергії та втратою тепла. Однак це не означає, що немає необхідності враховувати теплоємність нагрівальної тканини. Вища теплоємність є корисною для стабільності контролю температури. Нагрівальний елемент із недостатньою тепловою потужністю матиме сильні температурні коливання.

Теплова дифузія є ще одним критичним параметром в аналізі теплопередачі, який вимірює здатність проводити теплову енергію відносно накопичення теплової енергії. У речовині з високою тепловіддачею тепло швидко проходить через нього. Таким чином, тепла розхідність тісно пов'язана з регулюванням температури нагрівального елемента. Нагрівальний елемент із високою тепловіддачею матиме більші втрати тепла в процесі нагрівання та потребуватиме більше електроенергії. Таким чином, нагрівальний елемент з більш високою тепловіддачею може досягти лише нижчої температури нагріву. Постійна температура нагрівання є ще однією критичною характеристикою гнучких нагрівачів, оскільки вона безпосередньо визначає продуктивність нагріву. На постійну температуру впливають теплоємність і тепловіддача. Оскільки одним із життєво важливих конструкційних матеріалів гнучких нагрівачів є стійкі до опору нагрівальні елементи при деформації; таким чином, нагрівач буде підтримувати постійну температуру при деформації. Існує ще одна перевага гнучких нагрівачів, що постійна температура може адаптуватися до різної прикладеної напруги. Більше того, гнучкі нагрівачі можуть досягати високої сталої температури при низькій прикладеній напрузі при відносному покращенні електропровідності.

Робоча напруга. Окрім властивих параметрів нагрівачів, робоча напруга є одним із критичних факторів зовнішнього впливу. Висока робоча напруга призведе до підвищення температури через ефект Джоуля у властивостях нагрівачів. Наприклад, Wang et al.[148] представляє композитні аерогелі з

целюлози/поліпіролу/поліуретану зі стабільними нагрівальними характеристиками. Пористий аерогель буде досягати 55, 100 і 173 °C при робочій напрузі 2, 3 і 4 В відповідно. Крім того, діапазон робочої напруги нагрівачів зазвичай становить від 0 до 50 В.[169] Однак висока робоча напруга вимагає більш високих вимог до виготовлення пристрою. З іншого боку, висока робоча напруга неможлива для пристроїв, які можна носити, і використання ресурсів більшої потужності неефективно. Більше того, діапазон робочої напруги також важливий для управління теплом. Різні робочі напруги визначають різні прикладні характеристики гнучких нагрівачів. Підсумовуючи, робоча напруга не може бути надто високою за умови потрібної продуктивності первинного опалення. З розробкою гнучких нагрівачів ми вважаємо, що робоча напруга матиме розумне значення, яке зможе задовольнити фактичні вимоги застосування та знизити вартість виробництва.

Протягом останніх років нанотехнології та досягнення в області гнучких нагрівачів призвели до величезної різноманітності застосувань, які вимагають чудової стабільності при механічних навантаженнях. І діапазон деформації та модуль Юнга є двома ключовими параметрами для гнучких нагрівачів. Діапазон деформації є важливою властивістю пристрою, яка безпосередньо пов'язана зі здатністю нагрівачів до деформації. Випробування демонструють на розтягування з супутнім записом температури інфрачервоною камерою, що характеризується стабільністю на розтяг. Більше того, існує два методи збільшення діапазону деформації нагрівачів, що деформуються, інноваційні матеріали та чудовий структурний дизайн, які ми обговорювали раніше. Модуль Юнга визначає максимальне навантаження, яке можуть витримати гнучкі нагрівачі. Гнучкий переносний пристрій із високим модулем Юнга – це те, що ми очікуємо. Перш за все, з розробкою гнучких нагрівачів висуваються більші вимоги до механічних властивостей.

Циклічна стабільність є одним із критичних параметрів для гнучких нагрівачів, включаючи електричну [155], механічну [248] та термоциклічну

стабільність [138]. Необхідно забезпечити стабільність електропровідності та нагріву, коли гнучкі нагрівачі піддаються різним прикладеним напругам. Кілька тестів можуть бути виконані для запису температур і опорів, як-от перевірка напруги [148]. Термічна стабільність має вирішальне значення для гнучких нагрівачів, оскільки вона пов'язана з потенційною деградацією активних матеріалів через високі температури та високу швидкість нагрівання. Що стосується механічної стабільності, типові вимірювання проводяться універсальною механічною випробувальною машиною, як цикли зняття напруги. Крім того, кількість циклів також є дуже важливим параметром. Для нагрівачів, що деформуються, це зазвичай становить від 100 до 5000 разів[185]. Стабільність циклів нагрівачів, що деформуються, відіграє життєво важливу роль у різних середовищах, обмежуючи можливість використання нагрівачів, що деформуються. І це буде вдосконалено в майбутньому розвитку гнучких нагрівачів.

Температурний діапазон є одним із найважливіших параметрів, який представляє найвищу температуру яку нагрівач може досягати. Виходячи з цього, діапазон температур повинен бути ширшим. У звітах температурний діапазон приблизно в межах 160 °С. І діапазон температур в межах 250 °С є відповідним діапазоном. Вища провідність не тільки допомагає економити енергію, але й генерує більше тепла відповідно до закону Джоуля. Час відгуку контролюється в межах 5 с, що в майбутньому є більш вигідним для застосування гнучких нагрівачів. А робоча напруга визначає, чи простий нагрівальний пристрій у виготовленні і чи можна його використовувати в поєднанні з іншими носимими пристроями. Краще регулювати напругу від 0 до 220 В. Розтяжність і час циклу також є фундаментальними та життєво важливими параметрами для гнучких нагрівачів. Однією з найбільших відмінностей між гнучкими обігрівачами та традиційними є те, що гнучкі нагрівачі можуть підтримувати стабільну температуру при великій деформації. Діапазон деформації гнучкого нагрівача повинен бути більше 100%, а

температура залишається стабільною, і якомога більше. Тривалість циклу необхідно постійно покращувати, а стабільність циклу понад 10000 разів є основною вимогою для практичного застосування гнучких нагрівачів.

Як описано вище, нагрівачі, що деформуються, пов'язані з численними застосуваннями. Виготовлення гнучких нагрівачів, як правило, здійснюється для реалізації конкретного пристрою та конкретного застосування. Тому вибір матеріалів і конструкцію слід розглядати відповідно до специфікацій роботи пристрою. Існує безліч технічних застосувань, включаючи датчики, пристрої для запобігання запотіванню, медичне застосування, електронну шкіру та інші.

Підсумовуючи, розвиток обігрівачів є швидким, і ми стали свідками їх переходу від традиційних обігрівачів до гнучких обігрівачів, які можна носити. Гнучкі обігрівачі стануть важливими персональними пристроями керування температурою з широким застосуванням в майбутньому. Більше того, для підвищення гнучкості та термостійкості нагрівачів при конструюванні гнучких нагрівачів застосовуються різні унікальні структури. Кілька шарів, текстиль, острівні мости, структури кірігами та структури ядро-оболонка є кількома популярними структурами, які використовуються. Завдяки своїй чудовій продуктивності та величезному потенціалу гнучкі обігрівачі поступово застосовуються в датчиках, пристроях для захисту від обледеніння, медичних додатках тощо. Хоча деформуючі обігрівачі все ще перебувають у зародковому стані, варто з нетерпінням чекати їхнього майбутнього застосування інтернет речей та штучного інтелекту.

З огляду на літературні джерела, ми зрозуміли, що було проведено значні дослідження щодо створення композитних електропровідних покриттів. Ми плануємо розробити власні рецептури електропровідних композитних покриттів різними методами та методами нанесення для встановлення їх характеристик.

РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Характеристики вихідних матеріалів

Для створення полімерних плівкових композитних матеріалів у дисертаційній роботі використовували різні за властивостями полімерні матеріали, у якості матриці(зв'язуючого), різні за природою та властивостями наповнювачі та допоміжні речовини та матеріали. У якості зв'язуючого використовувались полімери: полівінілбутираль, бакелітова смола, нітроцелюлоза, силікат натрію. Композитні полімерні матеріали наповнювали різними за морфологією вуглецевими наповнювачами: сажа, графіт, вуглецеві нанотрубки. Також як наповнювач використовували карбонат кальцію. Допоміжними речовинами та матеріалами для приготування полімерних плівкових матеріалів були 3-аминопропилтриетоксисилан, декабромдіфенілоксид та ізопропіловий спирт.

2.1.1 Полімерні зв'язуючі

2.1.1.1 Полівінілбутираль (ПВБ) - синтетичний аморфний полімер без кольору і запаху. ПВБ отримують в результаті взаємодії полівінілового спирту (ПВА) і масляних альдегідів. Він характеризується високою адгезією до різних поверхонь, відмінними оптичними і плівкоутворюючими властивостями, хорошими фізико-механічними властивостями (еластичність, ударна в'язкість і зносостійкість), морозостійкістю і світлостійкістю, стійкістю до кисню і озону. Він не розчинний у воді, але добре розчинний в органічних розчинниках (складних ефірах, спиртах, кетонах, бензолі і т.д.). При цьому додавання 5% води значно покращує розчинність). Структурна формула зображена на малюнку рис. 2.1.

ПВБ застосовується як ґрунтовки та покриття, друкарські фарби для упаковки, плівки для безпечного скла, зв'язуючий елемент для кераміки та

металевого порошку, клеї, покриття для світло відбиваючих дорожніх знаків і дорожньої розмітки, зв'язуючий матеріал.

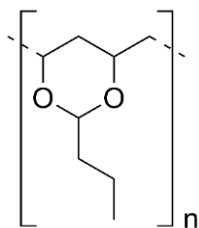


Рисунок 2.1 - Структурна формула полівінілбутиралу.

Фізичні властивості ПВБ залежать від співвідношення трьох мономерних одиниць, середньої молекулярної маси та молекулярно-масового розподілу, які можна регулювати в процесі виробництва, тому їх можна змінювати в широкому діапазоні значень. В'язкість розплаву і розчину ПВБ зростає зі збільшенням молекулярної маси і вмісту фрагментів вінілового спирту. Міцність матеріалу на розрив збільшується зі збільшенням процентного вмісту спиртових одиниць (при постійній молекулярній масі).

ПВБ має дуже високу адгезію до скла. Передбачається, що між гідроксильною групою полімеру та силанольною групою (Si-OH) на поверхні скла утворюються як водневі, так і ковалентні зв'язки (в останньому випадку отримують алкілсиліловий ефір). Волога і домішки іонних сполук знижують адгезію і конкурують з OH-групою ПВБ за утворення зв'язків з силанольними фрагментами на поверхні скла. Група-OH у полівінілбутиралі може взаємодіяти з дієоксидами та діізоціанатами, фенолами та карбамідоформальдегідними смолами, багатьма основними кислотами, хроматами та дихроматами металів, утворюючи зшиті нерозчинні продукти.

Здатність утворювати хімічні зв'язки з багатьма сполуками забезпечує високу адгезію до широкого спектру конструкційних матеріалів, а також при виробництві клеїв, герметиків, друкованих плат, абразивних і сполучних речовин, фарб і покриттів.

У роботі використовували ПВБ марки SDW-3A. Основні властивості деяких марок ПВБ наведені у порівняльній таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Основні властивості лакового ПВБ різних марок

Марка		ТВ30 (SDW-1A)	ТВ45 (SDW-2A)	ТВ60 (SDW-3A)
Форма		Білі гранули або порошок		
Леткі речовини, %, ≤		2,0		
Зольний залишок, %, ≤		0,08		
Чистота, %, ≥		97,9		
Кислотне число, мг КОН/г, ≤		-		
вміст полівінілацеталу, % (м/м)		75-77	75...78	76...79
вміст полівінілацетату, % (м/м)		18-21	18...21	18...21
вміст вінілацетату, % (м/м), ≤		3		
В'язкість	6% розчин в метанолі, мПа·с	4...6	5...7	9...18
	5% розчин в н-бутанолі, мПа·с	20...30	27...32	45...80
	10% розчин в н-бутанолі, мПа·с	90...150	15...175	----
прозорість	430 нм, %, ≥	86		
	660 нм, %, ≥	94		
	Візуальна оцінка	Безколірний та прозорий		

Переваги перед іншими матеріалами: відмінна адгезія до алюмінію, сталі, оцинкованої сталі, чорних металів, скла, дерева, паперу, шкіри, кераміки, картону; широка сумісність з модифікованими смолами і добавками, такими як підсилювачі адгезії; хороша антикорозійний захист при відсутності хромату цинку; швидке висихання і низький вміст розчинника; дозволяє наносити зверху практично будь-який тип фарби; можливість отримання непористих швів при зварюванні; покращена адгезія, плинність та еластичність у поєднанні з аміносмолою, епоксидною смолою та фенолформальдегідною смолою; краще зшивання та сумісність з фенольною смолою, сильніший

пластифікуючий ефект; нетоксичний, зі слабким запахом, прозорий і безбарвний; відмінна дисперсія пігменту.

2.1.1.2 Бакеліт — твердий, міцний і теплоізоляційний матеріал, використовується як електроізолятор. Бакелітові смоли екстрагують в реакторі сумішшю фенолу, формаліну і каталізатора. Коли у складі смоли утворюється щонайменше один моль формальдегіду на моль фенолу, утворюється термореактивна смола бакеліт (застаріла технологічна назва *resol*). Отриману суміш нагрівають до 95°C, щоб почати реакцію поліконденсації. У нижній частині реактора утворюється густа сиропоподібна маса коричневого кольору — бакелітова смола. При кімнатній температурі смола являє собою тверду крихку речовину коричневого кольору. Бакеліт використовується в якості матриці при виробництві пластмас і для виготовлення бакелітових трекерів. Полімеризація бакеліту здійснюється в три етапи і завершується при температурі вище 110-140°C. При температурі 160°C утворюється міцний, але менш еластичний термореактивний матеріал, і полімеризація відбувається за 1-3 хвилини. Бакелітові смоли використовуються для просочення деревини та інших матеріалів, для виготовлення пластмас, особливо для шаруватого гетинаксу, текстоліту та ін. Структура бакеліту представлена на рис 2.2.

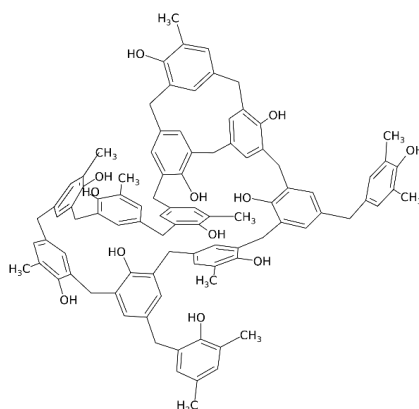


Рисунок 2.2 - Просторова структура бакеліту.

Бакеліт використовують для виготовлення: деталей широкого спектру у машинобудуванні, гальмівні колодки для вагонів метро, абразивні інструменти, ескалатори, інструменти для електроприладів, електротехнічні вироби-вилки, розетки, вимикачі, електролічильники, електричні праски, корпуси двигунів, реле і магнітні пускачі, клемні коробки, корпуси різних пристроїв-телефонів, радіоприймачів, фотоапаратів; деталі елементів електронного обладнання-радіолампи, електронно-променевої трубки, конденсатори і т. д., деталі озброєння та військової техніки, елементи кухонного приладдя: ножі, ручки для каструль, сковорідок, чайників, газових плит, фанера і ДСП, текстоліт-матеріал для виготовлення друкованих плат і конструкційних матеріалів, клеї та лаки-клеї.

2.1.1.4 Нітроцелюлоза. Нітроцелюлоза це легкозаймиста сполука, що утворюється в результаті нітрування целюлози шляхом впливу суміші азотної та сірчаної кислот. Однією з перших значних застосувань нітроцелюлози була вогнева вата, заміна пороху у вогнепальній зброї. У формі колодія нітроцелюлоза також була важливим компонентом ранньої фотографічної емульсії, використання якої зробило революцію у фотографії 1860-х років. Структурна формула нітроцелюлози зображена на рисунку 2.3.

Основним застосуванням нітрату целюлози є виробництво лаків і покриттів, вибухових речовин і целулоїду.

Що стосується лаків і покриттів, нітроцелюлоза легко розчиняється в органічних розчинниках, які після випаровування залишають безбарвну, прозору, гнучку плівку. Нітроцелюлозні лаки використовувалися як оздоблення меблів і музичних інструментів.

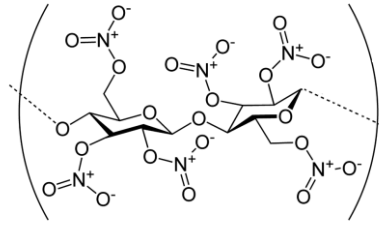


Рисунок 2.3 - Структурна формула нітроцелюлози.

Guncotton, розчинений приблизно на 25% в ацетоні, утворює лак, який використовується на попередніх етапах оздоблення деревини для отримання твердого покриття з глибоким блиском. Зазвичай це перший шар, який наноситься, шліфується, а потім інші покриття, які з'єднуються з ним.

У роботі була використана нітроцелюлоза марки А-400. Основні властивості наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2.

Основні властивості нітроцелюлози

Марка	А-400
Вміст нітроцелюлози, %	57
Вміст етилацетату, %	30
Вміст етанолу, %	13
Сухий залишок, % (ASTM D 1644)	40
В'язкість при 20°С (2 частини етилацетату + 1 одиниця лаку з чашкою 4), сек	25-35
Щільність при 25°С ASTM D 1475, г/см ³	0,94±0,01
Температура спалаху ASTM D 93, °С	<20

2.1.2 Електропровідні наповнювачі

2.1.2.1 Графіт. Графіт є кристалічною формою вуглецю. Він складається з накладених один на одного шарів графену. Графіт зустрічається в природі і є найбільш стабільною формою вуглецю за стандартних умов. Синтетичний і природний графіт споживається у великих масштабах для використання в олівцях, мастильних матеріалах і електродах. Під високим тиском і

температурами він перетворюється на алмаз. Він є хорошим (але не чудовим) провідником як тепла, так і електрики.

Графіт не окислюється на повітрі до температури 400°C, а у вуглекислому газі - до 500°C. Графіт утворює карбіди з більшістю металів, бором і кремнієм. Графіт починає вступати в реакцію з воднем при температурі 1200°C, а фтором при високих температурах вище 900°C.

У роботі використовували препарат колоїдно-графітовий сухий С-0 (КГП С-0) виробник ТОВ «Завалівський графіт», Україна. Сухі колоїдно-графітові препарати, це матеріали, що застосовуються для приготування графітових сумішей та мастил. Основні властивості КГП С-0 наведені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Основні властивості колоїдно-графітового препарату

Марка	С-0
Стандарт виробництва, №	ТУ - 113-08-48-63-90
Основний розмір частинок графіту, мкм	2,5-5
Масова частка вуглецю, % не менше	99,0
Масова частка золи, %	0,5 – 0,7
Масова частка сірки, % не більше	2
Масова частка вологи, % не більше	0,5

Графіт марки С-0 використовується в якості компонента для приготування графітових сумішей і технологічних мастил, виробництва хімічних і антикорозійних покриттів, пластифікуючих добавок при таблетуванні, клейових компонентів прогумованих тканин, контактів і резисторів та інших цілей.

2.1.2.2 Сажа це матеріал, який утворюється шляхом неповного згоряння кам'яновугільної смоли, рослинних речовин або нафтопродуктів, включаючи мазут, смолу каталітичного крекінгу та етилен. Сажа є формою паракристалічного вуглецю, який має високе співвідношення площі поверхні

до об'єму, хоча й нижче, ніж у активованого вугілля. Сажа використовується як барвник і армуючий наповнювач у шинах та інших гумових виробках; пігмент і добавка для захисту від зношування в пластмасах, фарбах і чорнильних пігментах, також використовується як харчовий барвник при виготовленні з рослинної сировини.

У роботі використовували декілька різних типів сажі, а саме сажу мароки Black Pearls® 2000 та Vulcan XC 72 виробник Cabot Corporation (США) та вітчизняну сажу марки N330 (ASTM D1765-19), виробник Кременчуцький завод технічного вуглецю (Україна). Основні властивості використаних марок сажі наведені у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

Основні властивості сажі

Марка	N330	Black Pearls® 2000	Vulcan XC 72
Вміст вуглецю, %	99	99.9	>99
Питома площа поверхні, м ² /кг	78-88·10 ³	1500	250
Число абсорбції йода, г/кг	82±5	-	253
Число абсорбції масла, см ³ /100г	102±5	-	174
Значення рН	7÷10	2 - 11	4 - 11
Втрати при нагріві %, не більше	1,0	<2,5	<2,5
Зольність, %, не більше	0,45	-	-
Насипна густина, кг/м ³ не менше	320	200-680 (гранула) 20-380 (порошок)	200-680 (гранула) 20-380 (порошок)
Густина, кг/м ³ не менше	1.7 - 1.9	1.7 - 1.9	1.7 - 1.9

Сажа марки N330 - найпоширеніша зносостійка марка для гуми, яка має чудову твердість і оброблюваність, а також надає гумі високу міцність на розрив, стійкість до розриву, довговічність і гнучкість. Сажа використовується в протекторі шин, чорній тканинній гумі, для внутрішніх приміщень і різних гумових промислових виробках.

Технічний вуглець VULCAN® XC-72 призначений для надання електропровідності гумовим і пластиковим сумішам. Технічний вуглець VULCAN XC-72 має виняткову чистоту, що підтверджується надзвичайно низьким рівнем екстракції розчинником, вмістом сірки, золи і залишку на ситі.

Технічний вуглець VULCAN XC-72 є промисловим стандартом, з перевіреними протягом багатьох років характеристиками провідності в широкому спектрі антистатичних і струмопровідних гумових і пластмасових виробів.

BLACK PEARLS® 2000 технічний вуглець – це провідний продукт із дуже дрібним розміром частинок, надвисокою площею поверхні та надзвичайно високою структурою. Це сажа, отримана в печі, призначена для важливих застосувань, які вимагають чудової провідності та хороших фізичних властивостей.

BLACK PEARLS 2000 сажа забезпечує відмінну провідність і антистатичні властивості при дуже низьких концентраціях в гумових сумішах. Сажа BLACK PEARLS 2000 має кращі властивості електропровідності в гумових сумішах, ніж інші електропровідні сажі.

2.1.2.3 Вуглецеві нанотрубки є формою вуглецю, який демонструє вражаючі електричні та оптичні властивості. Вони мають форму тонких порожніх циліндрів. Модуль пружності вуглецевих нанотрубок становить близько 1 ТПа (відомо, що модуль пружності алмазу становить 1,2 ТПа). Він має вищу міцність, ніж сталь при однаковій вазі. Ще однією важливою властивістю вуглецевих нанотрубок є електропровідність. Крім того, при високих температурах вуглецеві нанотрубки більше зберігають свої унікальні властивості в порівнянні з іншими матеріалами. Завдяки цим чудовим характеристикам нанотрубки зміцнюють багато матеріалів у промисловості. Більшість вуглецевих нанотрубок мають діаметр близько 1 нанометра, а довжина трубки може бути в мільйони разів більшою. Вуглецеві нанотрубки мають різноманітне застосування та використання: електронні нанопристрої

(діод, транзистор, нанопроводи), багатофункціональні композитні матеріали (захист від електромагнітного випромінювання, теплопровідність, висока міцність, електропровідність), зберігання водню, акумуляторні літієві батареї, суперконденсатори, сонячні батареї та сенсорні екрани, біосенсори тощо.

У роботі використовували нанотрубки NANOCYL NC7000 (Бельгія). Основні властивості нанотрубок NANOCYL NC7000 наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5

Основні властивості нанотрубок NANOCYL NC7000

Показник	Одиниці вимірювання	Значення	Методика вимірювання
Середній діаметр	нанометрів	9.5	ТЕМ
Середня довжина	мікрон	1.5	ТЕМ
Чистота вуглецю	%	90	TGA
Оксид металу	%	10	TGA
Аморфний Карбон	-	*	HRTEM
Область поверхні	м ² /г	250-300	БЕТ

Серія NANOCYL NC7000 це тонкий багат шаровий вуглець. Нанотрубки виробляються за допомогою процесу каталітичного осадження з парів вуглецю (CCVD). Застосовуються у сферах, що вимагають низького порогу електричної перколяції, такі як високоефективні електростатичні дисипативні пластики або покриття.

2.1.2.4 Карбонат кальцію. Карбонат кальцію - хімічна сполука з хімічною формулою CaCO₃. Це поширена речовина, яка зустрічається в гірських породах, як мінерали кальцит і арагоніт, особливо в крейді та вапняку, яєчній шкаралупі, раковинах черевоногих молюсків, скелетах молюсків і перлах. Матеріали, що містять багато карбонату кальцію або нагадують його, описуються як вапняні. Карбонат кальцію є активним інгредієнтом сільськогосподарського вапна і утворюється, коли іони кальцію в жорсткій воді реагують з іонами карбонату з утворенням вапняного нальоту. Його

використовують у медицині як добавку кальцію або як антацид, але надмірне споживання може бути небезпечним і спричинити гіперкальціємію та проблеми з травленням. Використовується як білий харчовий фарбник E170. Використовується в побуті для стелі, фарбування стовбурів дерев, для підлужування ґрунту в садівництві. Основні властивості марок карбонату кальцію наведені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6

Основні властивості марок карбонату кальцію

Марка	Omyacarb 15 - КА	Omyacarb 5 - КА
Хімічний склад, %		
CaCO ₃ 98	98	98
MgCO ₃	1.7	1.7
Fe ₂ O ₃	0.05	0.05
HCl нерозчинний вміст	0.2	0.2
Залишок на ситі 45 мкм, % (ISO 787-7)	0.8	0.1
Верхній зріз (d _{98%}), мкм	45	29
Середній розмір частинок (d _{50%}), мкм	17	6
Частинки < 2 мкм, %	8	24
Яскравість R _y (C/2°, DIN 53163), %	93.5	
-CIE L*, a*, b* (ISO 11664-4)	97 / 0.04 / 1	94.5
Індекс жовтизни (DIN 6167)	2.3	97.7 / 0.11 / 1.2
Вологість на заводі, % (ISO 787-2)	0.2	2.5
Позірна щільність, утрамбована, г/мл (ISO 787-11)	1.4	1
значення рН (ISO 787-9)	9.5	9.5
Поглинання масла, г/100г (ISO 787-5)	13	17
Поглинання VO, г/100г (ISO 787-5)	26	32

При виробництві паперу карбонат кальцію застосовують одночасно як відбілювач, наповнювач, а також розкислювач.

Використовується при виробництві силікатного скла - матеріалу для виробництва шибки, скляних пляшок, скловолокна.

Застосовується при виробництві предметів гігієни (наприклад, зубної пасти) у медицині.

У харчовій промисловості часто використовується як препарат, що перешкоджає злиття і для перешкодження злипання в грудки сухих молочних продуктах.

2.1.3 Допоміжні речовини та матеріали

2.1.3.1 Декабромдифенілоксид. Декабромдифенілоксид - біла, або майже біла порошкоподібна речовина. Практично не розчинний у воді; частково розчиняється в ацетоні, хлорбензолі, о-ксилолі та деяких інших органічних розчинниках. У разі високих температур декабромдифенілоксид здатний розкладатися із паром бромом. Промислове виробництво декабромдифенілоксиду засноване на вичерпному бромованні дифенілоксиду. Основне призначення декабромдифенілоксиду це використання в якості добавок, що ускладнюють горіння полімерів (антипірен). З цією метою його додають до термопластичних смол, поліетилену, полістиролу, поліефірних волокон, клеїв. Відомо його застосування у складі вогнезахисних покриттів для тканин та лакофарбових матеріалів. Основні властивості наведені в таблиці 2.7.

2.1.3.2 3-аминопропилтриетоксисилан (Dynasylan АМЕО). Dynasylan АМЕО - це біфункціональний силан з реакційноздатними первинними аміногрупами та етоксисилільними групами, що гідролізуються. Завдяки своїй подвійній реакційній здатності Dynasylan® АМЕО може використовуватися для хімічного з'єднання неорганічних матеріалів (скло, метали, наповнювачі) та органічних полімерів (терморективів, термопластів, еластомерів тощо), діючи як промотор адгезії, зв'язуюче та модифікатор поверхні Dynasylan АМЕО - це безбарвна або жовтувата малов'язка рідина із запахом аміну.

Розчинний у спиртах, аліфатичних або ароматичних вуглеводнях. Деякі характеристики Dynasylan® АМЕО наведені у таблиці 2.8.

Таблиця 2.7

Основні властивості декабромдіфенілоксиду

Хімічна формула:	C ₁₂ Br ₁₀ O
Фізичний стан	білий порошок
Білизна	93,4
Органічний бром, %	82,9
Точка плавлення, С°	307,6
Вологість, %	0,03
Вільний бром, мах. (мг/кг)	10
Середній розмір частинок, мікрон	2,68
Зміст Al (мг/кг):	20
Зміст Fe (мг/кг):	2

Таблиця 2.8

Характеристики Dynasylan АМЕО

Номенклатурна назва	3-аминопропилтриетоксисилан
Виробник	Evonik Industries
Країна виробник	Німеччина
В'язкість, мПа*с	1,85
Індекс рефракції	1,422
Щільність, г/см ³	0,95
Температура займання, °С	93
Температура кипіння, °С	68

У присутності води етокси-групи Dynasylan АМЕО гідролізуються з утворенням реакційноздатних силанольних груп (Si-OH), які можуть хімічно з'єднуватися з багатьма неорганічними субстратами. Під час гідролізу виділяється етанол. Органофільна функціональна аміно-група Dynasylan АМЕО може реагувати з відповідним полімером. Гідроліз Dynasylan АМЕО відбувається автокаталитично. Гідролізати стабільні при концентраціях вище 10% протягом 1 року. рН водного розчину близько 11. Приклади відповідних неорганічних субстратів: скло, скловолокно, скловата, мінеральна вата, кварц,

слюда, а також тригідрат алюмінію, дигідрат магнію, каолін, тальк, інші силікатні наповнювачі, металлоксиди і метали.

Dynasylan АМЕО є важливим інгредієнтом продуктів, що використовуються в багатьох галузях: композити зі скловолокна/скловолокна: як фінішний компонент або як наповнювач; ізоляційні та абразивні матеріали на основі мінеральних волокон: як добавка до фенольних в'язучих; як добавка до фенольних, фуранових і меламінових смол; герметики і клеї: як праймери або добавки для хімічної модифікації; полімери (композити), що містять мінеральні наповнювачі або самозатухаючі кабелі: як попередня обробка для наповнювачів і пігментів; лакофарбові матеріали: як добавки або ґрунтовки для поліпшення адгезії до основи; ґрунтовка для скла та металу.

Корисні властивості, отримані за допомогою Dynasylan® АМЕО, включають: покращені механічні властивості, такі як ударна в'язкість, міцність на вигин, міцність на розрив і модуль пружності; висока вологостійкість та покращена корозійна стійкість; покращені електричні властивості, такі як діелектрична проникність і питомий опір.

Dynasylan АМЕО також покращує наступні параметри: адгезію, дисперсність наповнювача, реологічну поведінку (зниження в'язкості, ньютонівської в'язкості), збільшення вмісту наповнювача.

2.1.3.3 Ізопропіловий спирт (назва ІUPAC пропан-2-ол, а також ізопропанол або 2-пропанол) це безбарвна легкозаймиста органічна сполука з різким спиртовим запахом. Він використовується у виробництві різноманітних промислових і побутових хімікатів і є поширеним інгредієнтом таких продуктів, як антисептики, дезінфікуючі засоби, засоби для дезінфекції рук і миючі засоби. Щорічно у світі виробляється понад один мільйон тонн.

Ізопропіловий спирт змішується з водою, етанолом і хлороформом, оскільки він є органічною полярною молекулою. Він розчиняє етилцелюлозу, полівінілбутираль, багато масел, алкалоїдів і природних смол. На відміну від етанолу або метанолу, ізопропіловий спирт не змішується з розчинами солей і

може бути відокремлений від водних розчинів додаванням солі, такої як хлорид натрію. Процес розмовно називається висолюванням і призводить до виділення концентрованого ізопропілового спирту в окремий шар.

Ізопропіловий спирт технічний застосовують у багатьох галузях промислового виробництва, безбарвну рідину використовується при виробництві миючих засобів, добавок до палива, що підвищують октанове число. Ізопропанол легко окислюється, перетворюючись на ацетон. Він є потужним розчинником і добре змішується з водою. Вплив етанолу може пошкодити вироби з гуми. У цьому спирті повністю розчиняються ефірні масла і смоли. Деякі властивості ізопропілового спирту наведені у таблиці 2.9.

Таблиця 2.9

Основні характеристики технічного ізопропілового спирту

Виробник	Технобудресурс
Країна виробник	Україна
Вміст спирту, %	98
Щільність, г/см ³	0,785-0,786
Масова частка кислот в перерахунку на оцтову кислоту становить, %	<0,0007
Бромное число, г броду на 100 г спирту	< 0,006
масова частка води, %	<0,15
масова частка диізопропілового ефіру, %	< 0,03
масова частка ацетону, %	< 0,03
Масова частка нелетючого залишку, %	< 0,006

2.2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.2.1 Методика приготування дослідних зразків

Приготування полімерних композитів відбувалось згідно рецептур наведених у розділі 3. Для приготування полімерних композицій було використано лабораторне устаткування млин тривалковий марки Exakt 35, верхньопривідний змішувач марки ІКА RW20 (діаметр дисольвернорі мішалки

- 50 мм), дисперсер(гомогенізатор) для диспергування 1000 мл 200 Вт Магніт ФСХ-2А, ступковий млин Fritsch Pulverisette Model 02-101, ультразвуковий диспергатор УЗДН-А1200.

Млин тривалковий ЕХАКТ 35 рис. 2.4 дозволяє забезпечити постійні та відтворювані результати. Порівняльне дослідження, проведене в Гамбурзькому університеті, Інститут фармації в Гамбурзі, Німеччина, прийшло до висновку, що якість мазей, оброблених за допомогою млинів ЕХАКТ, краща, ніж мазей, оброблених за допомогою електропровідних змішувальних систем. Дослідження підкреслило наступні висновки: розмір частинок менший, а розподіл частинок за розміром вузький. Стійкість мазі краща, під час обробки температура не підвищується, мазі мають більш м'яку консистенцію з нижчими межами розтікання, трьох валкові млини дозволяють контролювати якість під час обробки.



Рисунок 2.4 - Млин тривалковий ЕХАКТ 35.

ІКА RW20 верхньоприводна мішалка рис. 2.5, з допомогою якої можна швидко змішувати щільні і в'язкі рідини. Сфера застосування є нафтохімічна, косметична і харчова промисловість, медицина, фармацевтика і т. д. Розвиває швидкість від 60 до 2000 об./мін. швидкість надійно контролюється і точно підтримується. Дозволяє гомогенізувати всі компоненти фарби.



Рисунок 2.5 - Верхньоприводна мішалка ІКА RW20.

High Speed Homogenizer FSH 2A високошвидкісний диспергатор рис. 2.6 також відомі як високошвидкісні гомогенізатори. Гомогенізатор створений для високошвидкісного перемішування, емульгування і дезінтеграції рідин, суспензій, напівтвердих субстанцій.



Рисунок 2.6 - High Speed Homogenizer FSH 2A.

Ступковий млин Fritsch Pulverisette Model 02-101 рис. 2.7. Принцип роботи млина-ступки є найстарішим принципом подрібнення у світі. Завдяки своїй великій поверхні подрібнення застосовуваний пестик тиском і тертям подрібнює подрібнюваний матеріал об стінки і дно чаші млина ступки. Переваги ступкового млина це дуже рівномірне та щадне стирання, змішування або гомогенізація органічних та неорганічних проб без температурного навантаження у сухому середовищі або суспензії при 70 до 80 об/хв.



Рисунок 2.7 - Ступковий млин Fritsch Pulverisette Model 02-101.

Ультразвуковий диспергатор УЗДН-А1200 рис. 2.8 може подрібнювати зразки і отримувати емульсії до 0,01 μm , перемішувати (гомогенізувати) не змішуються суміші рідин, об'єднувати і розділяти деякі інші речовини (субстанції).



Рисунок 2.8 - Ультразвуковий диспергатор УЗДН-А1200.

Ультразвуковий диспергатор може реалізовувати різні функції, як наприклад, витяг, зіткнення, емульгування, одержання суспензій, прискорення осадження, кристалізації і змішування різних біологічних зразків для електронної мікроскопії і т. п.

Виготовлення зразків плівкових полімерних композитних покриттів відбувалось двома основними способами з використанням різних типів обладнання, застосовуючи різноманітні методики та час змішування.

Перший спосіб полягає в тому, щоб просто змішувати всі компоненти без подальшого перемелювання. В цьому випадку використовують дисольвер – пристрій, що забезпечує інтенсивне змішування матеріалів, рівномірно розподіляючи електропровідний наповнювач в полімерній матриці. Це сприяє підвищенню електропровідності та механічних характеристик композиту.

Другий спосіб полягає в тому, щоб спочатку отримати пасту наповнювача на краскотерці, дисольвері, ступковому млині, ультразвуковому диспергаторі. Паралельно готують розчин ПВБ на дисольвері. Після того, як обидва компоненти – паста наповнювача та розчин ПВБ – готові, вони змішуються на дисольвері для формування кінцевого електропровідного композиту. В результаті експериментів отримали основний спосіб технології електропровідного полімерного покриття, що передбачає кілька стадій рис. 2.9.

В процесі розробки електропровідних композитних матеріалів з використанням полівінілбутиралу (ПВБ) як зв'язуючого та електропровідних наповнювачів, ми виявили, що оптимальним методом є роздільне приготування компонентів. Зокрема, ефективність диспергування та змішування можна значно підвищити, готуючи окремо розчин ПВБ та пасту електропровідного наповнювача.

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 пасти. 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 пасти 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.

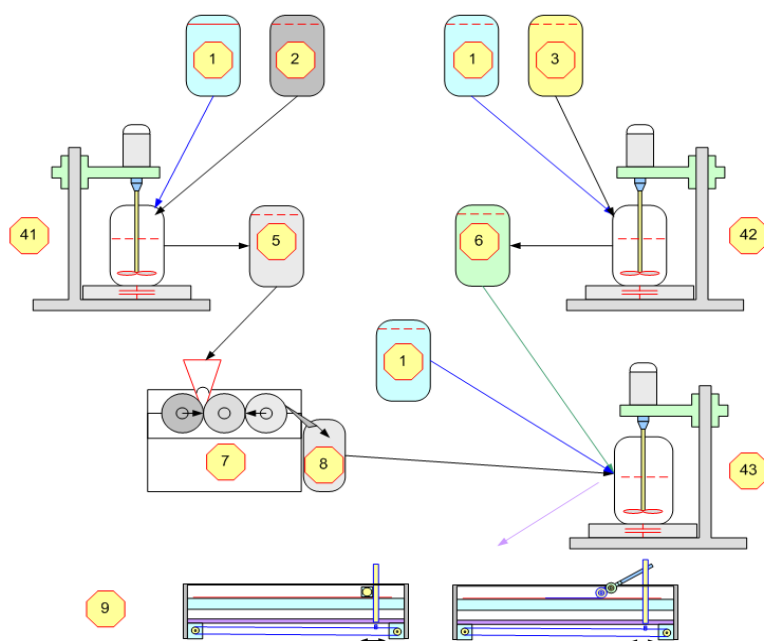


Рисунок 2.9 - Схема отримання електропровідного полімерного покриття: 1- розчинник; 2 – наповнювач; 3 – полімерна основа; 41 –дисольвер для отримання суміші наповнювач/розчинник; 42 – дисольвер для отримання розчину полімерної основи; 5 – суміш наповнювач/розчинник; 6 – розчин полімерної основи; 7 – 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.

Отриману однорідну суміш наносили на субстрат з біаксіально орієнтованої ПЕТ плівки за допомогою щілинного ракельного 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^2 , на який наносили покриття роликівим аплікатором роблячи 5-7 проходів роликком.

2.2.2 Методи контролю рідкого композитного матеріалу

2.2.2.1 Визначення сухого залишку фарби. Визначення сухого залишку фарби відбувалось згідно ДСТУ ISO 3233-2:2020 [249] та ДСТУ ISO 3233-1:2022 Фарби та лаки. Визначення об'ємної частки нелетких речовин. Частина 1. Метод визначення частки нелетких речовин та густини сухої плівки за законом Архімеда з використанням випробовуваної пластини з покриттям (ISO 3233-1:2019, IDT)[250].

2.2.2.2 Визначення товщини плівкового покриття. Визначення товщини для сухого плівкового полімерного композитного покриття механічним методом за допомогою мікрометра Mitutoyo 0-25 0.001 NO 293-265 рис. 2.10 згідно стандарту ДСТУ ISO 2808:2019 Фарби та лаки. Визначення товщини плівки (ISO 2808:2019, IDT) [251].



Рисунок 2.10 - Зображення мікрометра Mitutoyo 0-25 0.001 NO 293-265.

Гранулометричний склад визначали методом оптичної мікроскопії та метод визначення ступеня перетирання приладом "Клин" (гріндометром).

2.2.2.3 Метод визначення ступеня перетирання приладом "Клин" (гріндометром). Вимірювання проводяться згідно стандарту (міжнародний стандарт ISO-1524)[252]. Цей стандарт поширюється на пігментовані лакофарбові матеріали, дисперговані пігменти та наповнювачі та встановлює метод визначення ступеня перетирання приладом «Клин» (гріндометром) Рис.

2.11. Метод полягає у заповненні пробою рідкої фарби клиноподібного паза приладу «Клин» (гріндометром) у визначенні паза в мкм у місці появи у шарі видимих частинок або початку штрихів.



Рисунок 2.11 - Зображення приладу "Клин" (гріндометр).

2.2.2.4 Метод оптичної мікроскопії. Розмір і форму часточок наповнювача, а також структуру полімерних композитів вивчали у відбитому світлі за допомогою мікроскопа МВІ-15У42 рис. 2.12.



Рисунок 2.12 - Зображення мікроскопа МВІ-15У42.

Зображення були зроблені за допомогою цифрової камери DCM520 (USB2.0). Розміри конструктивних елементів були визначені за допомогою предметного мікрометра.

2.2.2.5 Метод електронної мікроскопії. Розмір, форму часток наповнювача та структуру полімерних композитів досліджували за допомогою скануючого електронного мікроскопа TESCAN MIRA3 LMU SEM рис. 2.13.

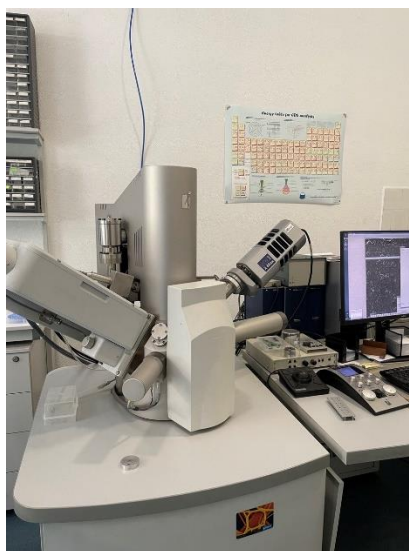


Рисунок 2.13 – Зображення електронного мікроскопа TESCAN MIRA3 LMU SEM.

Зображення були отримані з різними рівнями збільшення.

2.2.2.6 Визначення умовної в'язкості фарби. Для визначення умовної в'язкості фарби застосовують віскозиметр ВЗ-4 рис. 2.14 згідно ДСТУ ISO 2431:2015 [253] Фарби та лаки. Визначення часу витікання з використанням ліжок. Віскозиметр ВЗ-4, що має сопло діаметром 4 - 002 мм, призначений для визначення умовної в'язкості рідин в межах 20-150 с.



Рисунок 2.14 - Зображення віскозиметра ВЗ-4.

За умовну в'язкість лакофарбових матеріалів, що мають вільну плинність, приймають час безперервного закінчення в секундах певного

об'єму випробуваного матеріалу через каліброване сопло віскозиметра типу ВЗ-246.

За умовну в'язкість лакофарбових матеріалів густої консистенції, що визначається кульковим віскозиметром, приймають час проходження в секундах сталеві кульки між двома мітками вертикально встановленої скляної трубки віскозиметра, наповненої матеріалом.

2.2.2.7 Визначення в'язкості фарби з використанням ротаційного віскозиметра. Визначення в'язкості фарби проводили згідно ДСТУ ISO 2884-2:2015 Фарби та лаки. Визначення в'язкості з використанням ротаційного віскозиметра. Частина 2. Дисковий або кульковий віскозиметр, що працює за заданої швидкості (ISO 2884-2:2003, IDT) [254] рис. 5. 15.



Рисунок 2.15 – Зображення ротаційного віскозиметра.

2.2.3 Методи аплікації покриттів

Для створення покриттів використовувались два способи нанесення різними типами пристроїв: щілинний ракельний та роликовий аплікатори рис. 2.16.

Обидва види аплікаторів широко використовуються в технологіях створення покриттів – ракельний - для більш в'язких систем, роликовий – для систем з низькою в'язкістю. Роликовий 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.

Роликовий 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.

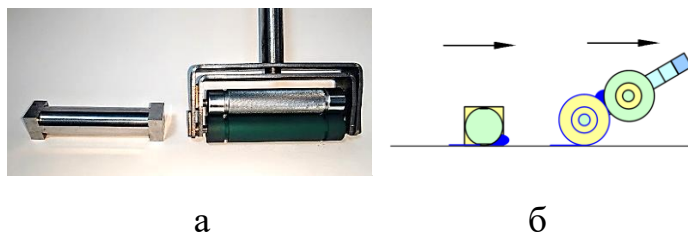


Рисунок 2.16 - Аплікатори для нанесення покриття: а – зовнішній вигляд; ліворуч – щілинний ракельний, праворуч – роликовий; б – схема формування шару щілинним ракельним (ліворуч) та роликовим (праворуч) аплікаторами.

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 та його товщини. При збільшенні товщини покриття відбувається зниження його електричного опору не залежно від технології нанесення, що пов'язано зі збільшенням частки електропровідного компоненту в одиниці об'єму дослідного зразка.

2.2.4 Методика формування плівкового нагрівача

Технологія отримання розчинів електропровідних полімерних композитів (фарб) та формування з них покриттів на поверхні субстратів детально описані в попередніх методиках. У якості субстрату на якому формувалося покриття використовували полімерну плівку з поліетилентерефталату, з товщиною 200 мікрон. Перед виготовленням плівкових нагрівачів поверхню полімерної плівки обезжирювали. На два протилежні краї полімерної плівки клеї мідні смужки у якості електродів нагрівача, шириною 10-15мм від краю. В центрі плівки не проклеєному

мідними смужками наносили шар липкої стрічки з поліетилентерефталату, щоб отримати єдину площину по всій поверхні плівки. Потім мідні електроди заклеювали на ширину 5мм від краю плівки малярним скотчем. Далі наносили електропровідний полімерний композит. Покриття з полімерного композиту наносили за допомогою регульованого ракельного аплікатора, котрий переміщували на поверхні субстрату зі стабільною швидкістю 50 мм на хв. Покриття висушували протягом 24 год при температурі 25°C та відносній вологості 75%. Після висихання полімерного композитного покриття зверху по всій його поверхні наклеювали липку стрічку з поліетилентерефталату. Загальний вигляд отриманого плівкового нагрівача зображений на рис. 2.17.



Рисунок 2.17 - Загальний вигляд плівкового нагрівача.

2.2.5 Визначення питомого об'ємного та поверхневого електричного опору

Електричний опір (R) - фізична величина, що характеризує властивість провідника перешкоджати проходженню електричного струму і дорівнює відношенню напруги на кінцях провідника до сили струму, що протікає по ньому формула 2.1.

$$R = \frac{U}{I} \quad (2.1)$$

де R – опір, Ω ; U - різницю електропровідних потенціалів (напруга) на кінцях зразка, V ; I - сила струму, що протікає між кінцями зразка під дією різниці потенціалів, A .

Питомий об'ємний електричний опір (ρ) В ідеальному випадку поперечний переріз та фізичний склад досліджуваного матеріалу однорідні по всьому зразку, а електричне поле та щільність струму скрізь паралельні та постійні. Багато резисторів та провідників насправді мають однорідний поперечний переріз з рівномірним потоком електричного струму і зроблені з одного матеріалу. У цьому випадку питомий об'ємний електричний опір можна розрахувати так:

$$\rho = R \frac{W \cdot H}{L} \quad (2.2)$$

де ρ - питомий об'ємний електричний опір, $\Omega \cdot \text{см}$; R - електричний опір однорідного зразка, Ω ; L – довжина зразка, см; W – ширина зразка, см; H – товщина зразка, см.

Питомий поверхневий електричний опір (ρ_s) Питомий поверхневий електричний опір чи опір листа, часто називають питомим опором листа, є мірою опору тонких плівок, номінально однорідних по товщині. Листовий опір застосовують до двовимірних систем, у яких тонкі плівки вважаються двовимірними об'єктами. Коли використовується термін "опір листа", мається на увазі, що струм проходить вздовж площини листа, а не перпендикулярно до нього. В цьому випадку поверхневий електричний опір можна розрахувати таким чином:

$$\rho_s = R \frac{W}{L} \quad (2.3)$$

де ρ_s - питомий поверхневий електричний опір, Ω/\square ; R - електричний опір однорідного листового зразка, Ω ; L – довжина зразка, см; W - ширина зразка, см (де товщина зразка $H \approx 0$)

Вимірювання об'ємного та поверхневого електричного опору. Існує декілька методів вимірювання питомого поверхневого та об'ємного електричного опору для полімерних електропровідних матеріалів в залежності

від електричного опору зразка. Для зразків з поверхневим опором, вищим за $5 \cdot 10^4 \text{ } \Omega/\square$ вимірювання електропровідності проводять за 3-електродною схемою відповідно для зразків з опором нижчим за $5 \cdot 10^4 \text{ } \Omega/\square$ проводять вимірювання 4-електродною схемою.

Принципова схема вимірювання питомого об'ємного електричного опору зображена на рис. 2.18.

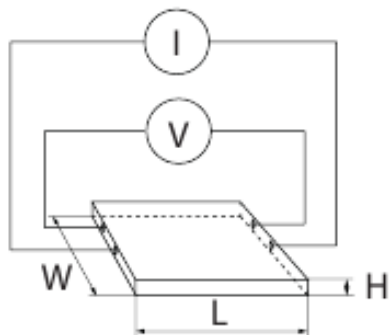


Рисунок 2.18 - Принципова схема вимірювання питомого об'ємного електричного опору: де I - джерело постійного струму, А; V - вольтметр, що вимірює напругу на кінцях зразка, V; L – довжина зразка, см; W – ширина зразка, см; H – товщина зразка, см.

Схематичне зображення вимірювання питомого поверхневого електричного опору показано на рис. 2.19.

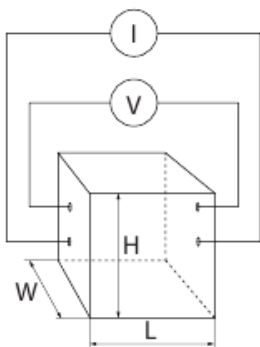


Рисунок 2.19 - Схематичне зображення вимірювання питомого поверхневого електричного опору: де I - джерело постійного струму, А; V - вольтметр, що вимірює напругу на кінцях зразка, V; L – довжина зразка, см; W – ширина зразка, см; H - товщина зразка, $H \approx 0$.

3-електродною схемою проводили вимірювання електрометром Keithley 6517A з 3-електродною коміркою ST2642-F01 (виробник Suzhou Jingge Electronic Co., LTD, Китай), відповідно до стандарту ASTM D257-07 Рис. 2.20.

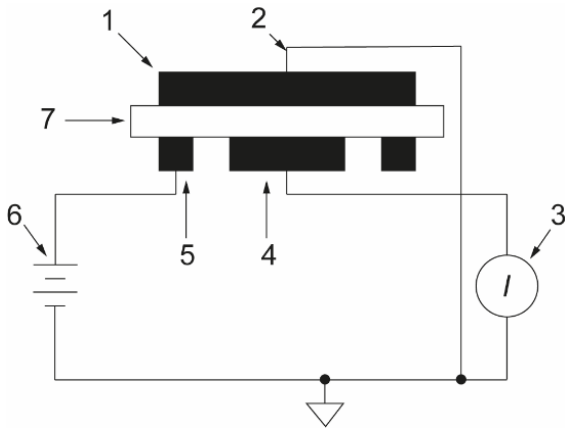


Рисунок 2.20 - Принципова схема вимірювання питомого поверхневого електричного опору полімерних композитів 3-електродною циліндричною коміркою: 1- верхній електрод; 2 - захист; 3 – амперметр; 4 – нижній вимірювальний електрод; 5 – нижній кільцевий охоронний електрод; 6 – джерело напруги; 7 – зразок.

На основі отриманих результатів розраховували питому поверхневу Формула (2.2) та об'ємну формула (2.3) електропровідність полімерних композитів.

$$\rho_s = R \cdot \frac{P}{g} \quad (2.4)$$

де ρ_s - питомий поверхневий електричний опір, Ω/\square ; R – виміряний поверхневий опір, Ω ; P - ефективний периметр кільцевого охоронного електроду, см; g - ширина зазору між вимірювальним та охоронним електродами, см.

$$\rho = \rho_s \cdot h \quad (2.5)$$

де ρ - питомий об'ємний електричний опір, $\Omega \cdot \text{см}$, ρ_s - питомий поверхневий електричний опір, Ω/\square ; h – товщина зразка полімерного композиту, см;

4-електродною схемою рис. 2.21 вимірювання проводили портативним електрометром D.C. Milli-Ohm Meter RM-804 з чотири точковим зондом ST2558B-F01-P (виробник Suzhou Jingge Electro nic Co., LTD, Китай) рис. 2.22.

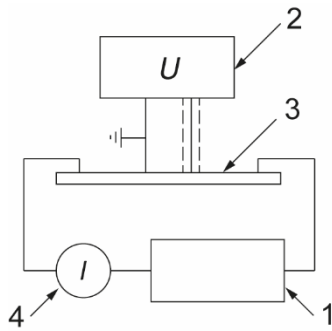


Рисунок 2.21 - Принципова схема вимірювання електричного опору 4-електродним зондом: 1 – джерело постійної напруги; 2 – електрометр; 3 – зразок; 4 – прилад для зміни струму.

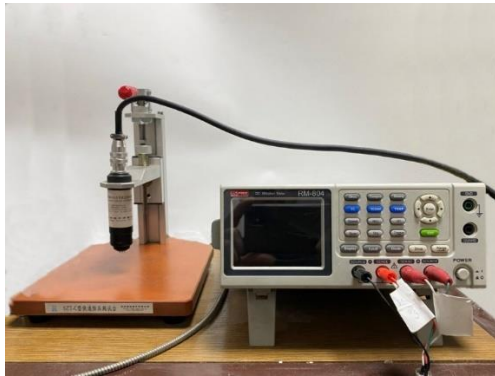


Рисунок 2.22 - Установка для вимірювання електричного опору полімерних плівкових композитів 4-електродним зондом: зліва - чотири точковим зондом ST2558B-F01-P; праворуч - портативний електрометр D.C. Milli-Ohm Meter RM-804.

4-електродним методом питому поверхневу електропровідність полімерних композитів розраховували згідно формули (2.6), для лінійного розташування електродів.

$$\rho_s = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot D \cdot \frac{U}{I} = 4.53 \cdot D \cdot \frac{U}{I} \quad (2.6)$$

де ρ_s - питомий поверхневий електричний опір, Ω/\square ; D – коефіцієнт корекції форми зразка та положення зонда при вимірюванні; U - різниця електропровідних потенціалів (напруга) на кінцях зразка, V; I - сила струму, що протікає між кінцями зразка під дією різниці потенціалів, A.

Питому об'ємну електропровідність полімерних композитів розраховували згідно формули 2.7.

$$\rho = \rho_s \cdot H \quad (2.7)$$

де ρ - питомий об'ємний електричний опір, $\Omega \cdot \text{см}$, ρ_s - питомий поверхневий електричний опір, Ω/\square ; H – товщина зразка полімерного композиту, см;

2.2.6 Визначення температурної залежності опору

Дослідження впливу температури на електричні властивості покриттів здійснювали у комірці для вимірювання опору, що оснащувалася нагрівальним столиком та блоком регулювання температури на основі регулятора температури Yamatake sdc15. Нагрів здійснювали від кімнатної температури до 120°C з кроком у 5°C.

Зразок нагрівали у комірці до заданої температури та витримували на протязі 10 хв для стабілізації значення температури, після чого вимірювальну частину опускали на зразок та фіксували значення опору.

Значення температурного коефіцієнта розраховували по формулі:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta T} \quad (2.8)$$

де: α - температурний коефіцієнт опору, R- опір провідника при початковій температурі, ΔR - зміна опору, ΔT - зміна температури.

Вимірювання електричного опору здійснювали за 4-х електродною схемою з використанням проводили портативним електрометром D.C. Milli-Ohm Meter RM-804.

На рис. 2.23 зображено вимірювальний стенд.



Рисунок 2.23 - Зовнішній вигляд вимірювальний стенд.

2.2.7 Вимірювання вольт-амперних характеристик композитних електропровідних покриттів

Вольт-амперна характеристика або вольт-амперна крива (крива струм-напруга) — це співвідношення, зазвичай представлене у вигляді діаграми або графіка, між електричним струмом, що проходить через ланцюг, пристрій або матеріал, і відповідною напругою або різницею потенціалів, через нього. В електроніці залежність між постійним струмом, що проходить через електронний пристрій і напругою постійного струму на його клеммах називається вольтамперною характеристикою пристрою. Такі схеми використовують для визначення основних параметрів пристрою та моделювання його поведінки в електричному ланцюзі. Ці характеристики також відомі як $I-V$ криві, посилаючись на стандартні символи струму та напруги. Найпростішою ВАХ є крива резистора, яка відповідно до закону Ома демонструє лінійну залежність між прикладеною напругою та результуючим електричним струмом. Струм пропорційний напрузі, тому ВАХ є прямою лінією через початок координат з додатним нахилом. Величина зворотна нахилу дорівнює опору. Криву ВАХ електричного компонента можна виміряти за допомогою приладу, який називається характеріограф. Коефіцієнт провідності та напруга Еарлі транзистора є прикладами параметрів, які традиційно вимірюються за допомогою ВАХ пристрою. Форма кривої ВАХ електричного компонента розкриває його робочі властивості. ВАХ різних пристроїв можна згрупувати в категорії.

Джерела живлення мають криві, що проходять через червоні області. Активний та пасивний : пристрої, які мають криві $I-V$, які обмежені першим і третім квадрантами площини $I-V$, що проходить через початок координат, є пасивними компонентами (навантаженнями), які споживають електроенергію з кола. Прикладами є резистори та електродвигуни. Звичайний струм завжди протікає через ці пристрої в напрямку електричного поля, від позитивної клеми напруги до негативної, тому заряди втрачають потенційну енергію в

пристрої, яка перетворюється на тепло або іншу форму енергії. Навпаки, пристрої з вольт-амперними кривими, які проходять через другий або четвертий квадранти, є активними компонентами, джерелами живлення, які можуть виробляти електроенергію. Прикладами є батареї та генератори. Коли він працює в другому або четвертому квадранті, струм змушений протікати через пристрій від негативної до позитивної клеми напруги проти протилежної сили електричного поля, тому електричні заряди набувають потенційної енергії. Таким чином, пристрій перетворює якусь іншу форму енергії в електричну. Лінійний або нелінійний: пряма лінія, що проходить через початок координат, представляє лінійний елемент схеми, тоді як крива лінія представляє нелінійний елемент. Наприклад, резистори, конденсатори та котушки індуктивності є лінійними, тоді як діоди та транзистори є нелінійними. Крива $I-V$, яка є прямою лінією через початок координат із позитивним нахилом, представляє лінійний або омичний резистор, найпоширеніший тип опору, який зустрічається в схемах. Він підпорядковується закону Ома. Струм пропорційний прикладеній напрузі в широкому діапазоні. Його опір, що дорівнює величині, зворотній нахилу прямої, постійний. Вигнута лінія $I-V$ представляє нелінійний опір, наприклад діод. У цьому типі опір змінюється залежно від прикладеної напруги або струму. Від'ємний опір проти позитивного опору: якщо крива $I-V$ має позитивний нахил (збільшується вправо), це означає позитивний опір. Крива $I-V$, яка є немонотонною (має піки та спади), представляє пристрій, який має від'ємний опір. Області кривої, які мають негативний нахил (знижується вправо), представляють робочі області, де пристрій має негативний диференціальний опір, а області позитивного нахилу представляють позитивний диференціальний опір. Пристрої з негативним опором можна використовувати для виготовлення підсилювачів і генераторів. Тунельні діоди та діоди Ганна є прикладами компонентів, які мають негативний опір. Гістерезис проти однозначних: пристрої, які мають гістерезис, тобто в яких

співвідношення струм–напруга залежить не лише від поточного прикладеного входу, але й від минулої історії входів, мають $I-V$ криві, що складаються з сімейства замкнутих контурів. Кожна гілка петлі позначена стрілкою в напрямку. Приклади пристроїв із гістерезисом включають індуктори та трансформатори із залізним сердечником, тиристри, такі як SCR та DIAC, і газорозрядні трубки, такі як неонові лампи.

Вимірювання вольт-амперних характеристик проводили на лабораторній установці, що складалась з лабораторного блока живлення SONER SN-305D цифрового мультиметра Fluke 87V з'єднаних із нагрівачем 4-електродною схемою рис. 2.24.



Рисунок 2.24 - Лабораторна установка для вимірювання вольт-амперних характеристик гнучких нагрівальних елементів.

З використанням наведених зв'язуючих і наповнювачів за представленими методами досліджень проведені дослідження зі створення композитних електропровідних покриттів та нагрівальних елементів дослідження їх та властивості представлені в наступних розділах.

2.2.8 Статистична обробка даних та точність вимірювання

Розрахунок вибіркового середнього проводиться за формулою:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

де, \bar{x} - вибіркоче середнє значення; x_i - величина, що вимірюється; n - число вимірювань.

Вираз для вибіркової дисперсії середньо випадкової величини має вигляд:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Величина орієнтовного стандартного відхилення для окремих значень визначається за формулою:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Статистична обробка експериментальних даних виконувалась за допомогою програми STATISTIKA 6.0.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ЗМІШУВАННЯ ТА СТВОРЕННЯ КОМПОЗИТНИХ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ПОЛІМЕРНИХ ПОКРИТТІВ

3.1 Дослідження технології одержання електропровідних покриттів

В останні роки інтерес до полімерних композитних матеріалів не припиняє зростати. Серед полімерних матриць, що привертають увагу, виділяється ПВБ через його специфічні характеристики. Зважаючи на це, дослідження впливу різних композитних наповнювачів на цю матрицю стає ключовим аспектом. У дослідженні було використано комбінації графіту, сажі.

Композитні покриття з електричними характеристиками знаходять все більше застосувань у сучасних технологіях завдяки своїй доступності, включаючи виробництво нагрівальних елементів, контроль статичної електрики. Вони представляють собою альтернативу електропровідним композитним матеріалам завдяки їхній здатності надавати об'єктам електричні властивості шляхом нанесення покриття на субстрат.

Технологія змішування має вирішальний вплив на структуру композитного матеріалу. Для руйнування агрегатів та агломератів використовують пристрої а саме диспергатор, ультразвуковий диспергатор, тривалковий млин, ступковий млин та дисольвер. Ці пристрої мають різний вид руйнування агломератів електропровідних наповнювачів. Дисперсійне змішування зосереджено на створенні однорідної суміші шляхом розподілу частинок (наповнювачів, пігментів, або інших добавок) у полімерній матриці. В цьому процесі частинки не зазнають істотного змінення їх розміру або форми, а скоріше розподіляються більш рівномірно по всьому об'єму матриці. Таке змішування може здійснюватися за допомогою дисольверів чи міксерів, що мають низьку швидкість зсуву, і це важливо для систем, де важлива гомогенізація без зміни розміру частинок. Дистрибутивне змішування має на

меті не просто розподіл частинок в розчині, але й їх подрібнення та деагломерація. Цей процес включає застосування високої енергії чи сили зсуву для розбивання агломератів та зменшення розміру частинок до бажаного рівня. Дистрибутивне змішування часто застосовується в умовах, де необхідне інтенсивне змішування, як наприклад у використанні ультразвукових дисперсерів, високошвидкісних гомогенізаторів або ступкових млинів. Схематичні зображення змішувачів рис. 3.1.

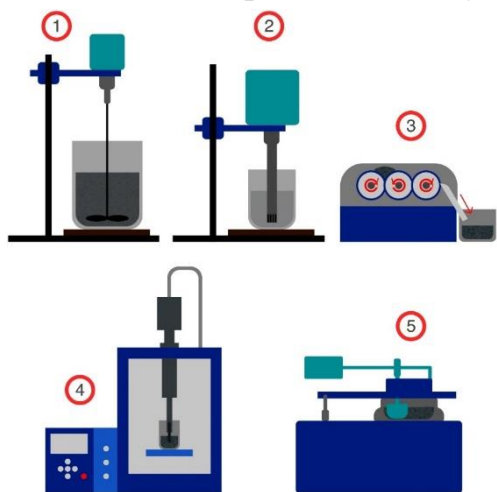


Рисунок 3.1 - Схематичні зображення змішувачів: 1- верхньоприводна мішалка; 2- диспергатор; 3- тривалковий млин; 4- ультразвуковий диспергатор; 5- ступковий млин.

Різниця між цими двома типами змішування полягає у механізмі впливу на компоненти суміші і в кінцевому результаті цього впливу. Дисперсійне змішування в основному зосереджене на розподілі частинок, тоді як Дистрибутивне змішування також займається їх подрібненням і деагломерації для досягнення більшої однорідності і покращення властивостей суміші.

3.1.1 Дослідження технології сумісного змішування складових композитних електропровідних покриттів

Метод змішування критично впливає на формування структури композитних матеріалів. Дисольвер та змішувачі, які працюють на принципі механічного перемішування компонентів, є відмінним рішенням для гомогенізації різних компонентів. Вони зазвичай мають обертові лопаті або пропелери, які забезпечують рівномірне розподілення частинок в матеріалі.

Технологія змішування складових електропровідного композита, перший спосіб полягає в тому, щоб просто змішувати всі компоненти без подальшого перемелювання. В цьому випадку використовують дисольвер – пристрій, що забезпечує інтенсивне змішування матеріалів, рівномірно розподіляючи електропровідний наповнювач в полімерній матриці рис. 3.2.

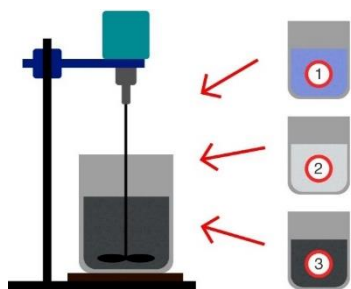


Рисунок 3.2 - Схема отримання електропровідного композитного розчину: 1- розчинник; 2- полімер; 3- електропровідний наповнювач.

Для досліджень використовували модельну композицію графіт С0-60%, сажа ХС72-10%, та полімерна матриця ПВБ-30%.

Композицію завантажили всі компоненти і перемішували з допомогою дисольверної мішалки з верхньопривідним змішувачем для диспергування завдяки кавитаційному ефекту. Змішували на протязі 24 годин швидкість обертання дисольвера становила (300об/хв). Додавали розчинник для корекції сухого залишку. Відбирали зразки через 2 години, перевіряли сухий залишок та опікували ракельним аплікатором в ручну на субстраті ПЕТ. За методом ракельного нанесення було створено композитні електропровідні покриття з початковою товщиною в 50, 75 та 100 мікрон, які після процесу сушіння зменшилися до 25, 30 та 35 мікрон відповідно. Зразки сушили протягом 24 годин при 25 °С. Виміряли отримані зразки композитного електропровідного покриття. І в результаті одержали залежність опору від часу змішування в годинах рис. 3.3.

З отриманих результатів, впливає що за 10 перових годин відбулося не суттєве падіння опору. Можливо завдяки не суттєвого руйнування агрегатів. Після 10 годин змішування дисольвером спостерігаєм суттєве падіння опору. Після 20 годин змішування дисольвером значення опору поступово

знижується подалі але не так суттєво. Отримали зразки з агломератами значно меншого розміру але ще суттєвий вміст агломератів присутній в електропровідному композитному розчині хоча вже в полімерному композитному покритті заважає не погану перколяцію. Якість перетирання оцінювали за допомогою гріндометра.

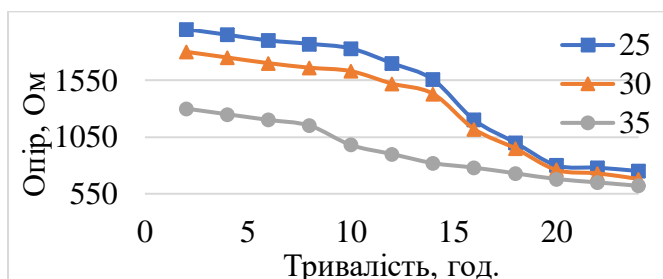


Рисунок 3.3 - Залежність опору від тривалості змішування для дисольвера, для різних товщин покриття.

Суттєве падіння опору після 10 годин змішування може ймовірно свідчити про ефективне руйнування агломератів і більш рівномірне розподілення частинок у матриці, що підвищує електропровідність за рахунок збільшення контактів між провідними частинами. Додаткове змішування після 20 годин призводить до подальшого зниження опору, хоча це зниження вже не таке інтенсивне, що може вказувати на досягнення оптимальної дисперсії частинок.

Метод змішування на ступковому млині є ключовим у формуванні структури електропровідних композитного розчину, використовуючи модельну рецептуру. Контроль часу на ступковому млині забезпечує рівномірний розподіл наповнювачів у матриці ПВБ, підвищуючи електропровідність композиту. Застосування цього методу мінімізує утворення агломератів і сприяє стабільності структури рис. 3.4.

Всі компоненти модельної рецептури, були завантажені у ступковий млин. Процес змішування в ступковому млині забезпечує інтенсивне перемішування та подрібнення компонентів, ефективно розподіляючи

частинки наповнювачів у полімерній матриці. Змішування тривало 3 години, при цьому швидкість обертання ступки була встановлена на рівні 30 обертів на хвилину. Під час процесу контролювали сухий залишок, при необхідності додавали розчинник для коригування вмісту твердих речовин.

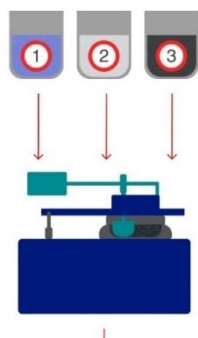


Рисунок 3.4 - Схема отримання електропровідного композитного розчину: 1- розчинник; 2- полімер; 3- електропровідний наповнювач.

Зразки композиту були відібрані кожні 30 хвилин для контролю сухого залишку, перед нанесенням на ПЕТ-субстрат. Нанесення композиту відбувалося вручну за допомогою ракельного аплікатора, що дозволило отримати електропровідні покриття з початковими товщинами 50, 75 та 100 мікрон. Після 24 годин сушіння при температурі 25 °C кінцева товщина покриттів зменшилась до 25, 30 та 35 мікрон відповідно. Після сушіння зразків, було виконано вимірювання характеристик готових композитних електропровідних покриттів. В результаті було встановлено залежність електричного опору покриття від часу змішування в годинах, демонструючи важливість ретельного контролю процесу змішування в ступковому млині рис. 3.5.

З результатів, отриманих під час змішування електропровідного композиту в ступковому млині, було встановлено, що товщина покриття має значний вплив на електричний опір композиту. Під час перших годин змішування в ступковому млині спостерігалось лише незначне зниження електричного опору, що може бути пояснено неефективним розбиванням агломератів. Однак, з подальшим змішуванням було відзначено більш значне зниження опору, що свідчить про ефективне диспергування сажі та інших компонентів.

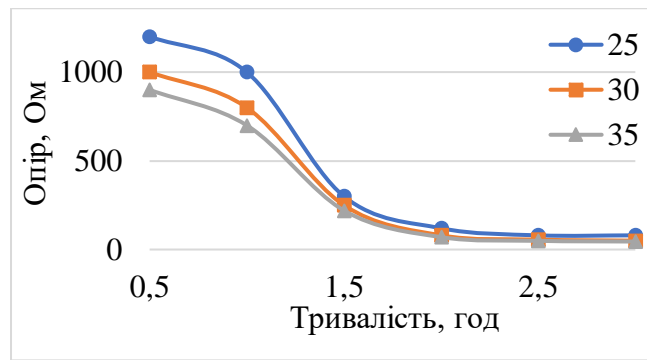


Рисунок 3.5 - Залежність опору від тривалості змішування для ступкового млина, для різних товщин покриття.

Після двох годин змішування в ступковому млині, падіння опору стало менш вираженим, але все ще прогресувало. Це вказує на те, що хоча агломерати і мали значно менший розмір, все ще була присутня певна кількість у композитному розчині. На цьому етапі в КЕП спостерігалася задовільна перколяція. Якість розподілу частинок в композиті оцінювалася за допомогою гріндометра, що дозволило визначити розмір та розподіл агломератів у суміші.

Порівнюючи з попереднім методом, можна зробити висновок, що змішування у ступковому млині було більш ефективним у руйнуванні агломератів та досягненні рівномірного розподілу частинок у коротший проміжок часу.

У підсумку, обидва методи змішування покращують електропровідні властивості композиту, але змішування на ступковому млині є більш ефективним і швидким способом для досягнення цих властивостей.

Метод змішування компонентів за допомогою ультразвукового дисперсера. Ультразвукова дисперсія надає унікальні переваги у процесі змішування, дозволяючи досягнути високої ступені дисперсії наповнювачів.

Під час змішування ультразвуком, важливо контролювати такі параметри, як частота, та тривалість обробки. Це забезпечує ефективне розподілення та розбивання агломератів сажі та графіту в полімерній матриці ПВБ. Ультразвукова обробка створює кавітаційні бульбашки у розчині, що при

їх імплзії викликають інтенсивні мікроудари, ефективно руйнуючи агломерати та забезпечуючи більш однорідне розподілення наповнювачів.

Такий метод змішування сприяє формуванню композитних матеріалів з покращеною електропровідністю, оскільки більш рівномірний розподіл провідних частинок сприяє створенню ефективних перколяційних мереж у полімерній матриці рис. 3.6.

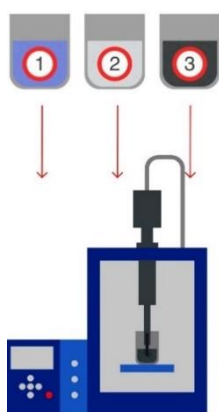


Рисунок 3.6 - Схема отримання електропровідного композитного розчину: 1- розчинник; 2- полімер; 3- електропровідний наповнювач.

В процесі виготовлення електропровідних композитних покриттів застосування ультразвукового дисперсера демонструє унікальний підхід до обробки компонентів. Всі необхідні компоненти, модельної рецептури, були завантажені в установку для ультразвукової обробки.

Змішування тривало 10 хвилин, при цьому установка працювала на потужності 400 ват і при температурі 70°C. Важливою складовою процесу було контролювання сухого залишку, і за необхідності проводилося коригування вмісту твердих речовин шляхом додавання розчинника.

Зразки композиту відбирали кожні 2 хвилини для аналізу сухого залишку. Після цього вони наносилися на субстрат ПЕТ за допомогою ракельного аплікатора вручну. Завдяки методу ракельного нанесення було створено композитні електропровідні покриття з початковою товщиною 50, 75 та 100 мікрон, які після сушіння зменшилися до 25, 30 та 35 мікрон відповідно. Зразки піддавались сушінню протягом 24 годин при температурі 25 °C.

Після завершення процесу сушіння були виміряні характеристики отриманих зразків композитного електропровідного покриття. Результати показали, що залежність електричного опору покриття від часу змішування

була виразною, що підтверджує важливість точного контролю ультразвукового змішування рис. 3.7.

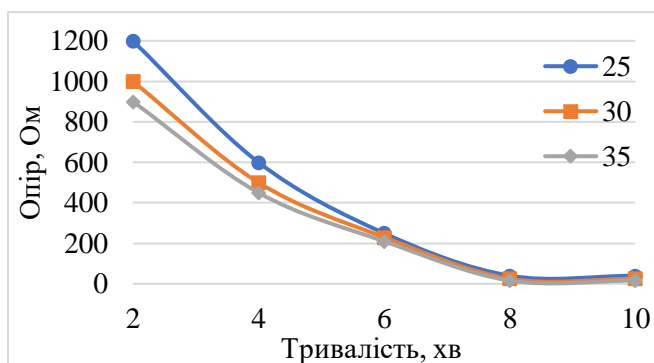


Рисунок 3.7 - Залежність опору від тривалості змішування для ультразвукового диспергування, для різних товщин покриття.

З результатів, отриманих під час змішування електропровідного композиту в ультразвуковому дисперсері, було виявлено, що товщина покриття істотно впливає на електричний опір композиту. Під час початкових етапів змішування з ультразвуком спостерігалось незначне зниження електричного опору, що можливо пояснити недостатньо інтенсивним розбиванням агломератів. Однак, з продовженням ультразвукової обробки було зафіксовано більш виражене зниження опору, що вказує на ефективне диспергування сажі та інших компонентів.

Після 6 хвилин змішування з ультразвуком, подальше зниження опору стало менш вираженим, але продовжувалося. Це свідчить про те, що незважаючи на значне зменшення розмірів агломератів, в композитному розчині досі була присутня не значна кількість агломератів. На цьому етапі в композитному полімерному покритті спостерігалася достатня перколяція. Ефективність розподілу частинок в композиті та розмір агломератів оцінювалися за допомогою гріндометра, що дозволило отримати точні дані щодо розміру та розподілу агломератів у суміші.

Але використання ультразвукового диспергування для промислового виробництва композитних матеріалів справді може виявитися економічно

неефективним, особливо коли мова йде про масштабне виробництво. Основна проблема полягає у високій вартості обладнання та енергоємності процесу, що є критичними для виробничих операцій. Ультразвукові системи вимагають значних інвестицій, і, хоча вони надзвичайно ефективні для дрібних експериментальних партій у лабораторних умовах, вони можуть не бути економічно виправданими для великомасштабного виробництва через високі операційні витрати, що включають споживання енергії та потребу у частому технічному обслуговуванні.

Порівняння цих трьох методів вказує на те, що ультразвуковий дисперсер найшвидше досягає зниження опору, що може вказувати на його вищу ефективність у розбиванні агломератів порівняно з іншими методами. Ступковий млин також є ефективним у руйнуванні агломератів, проте зниження опору відбувається повільніше, ніж ультразвуком. У дисольвері процес зниження опору є найповільнішим, що може свідчити про менш інтенсивне диспергування.

З результатів цих досліджень стає зрозуміло, що для значного покращення електричного опору композитних покриттів необхідно зосередитися на більш ефективному диспергуванні агломератів сажі та графіту. Зокрема, показано, що одночасне змішування всіх компонентів не завжди є найбільш ефективним методом для досягнення оптимальних властивостей покриття. Виявлено, що значно вищі показники якості можуть бути досягнуті завдяки відокремленому подрібненню наповнювачів, таких як сажа і графіт, до стану пасту з використанням спеціалізованого устаткування, зокрема трьохвалкового млина, ступкового млина та ультразвукового дисперсера, тоді як приготування розчину ПВБ ефективніше здійснювати за допомогою дисольвера. Наступним кроком слід гомогенізувати ці компоненти, використовуючи дисольвер або диспергатор.

Запропонованого методу полягає у роздільному приготуванні розчинів зв'язуючого полімеру та змочених наповнювачів або паст. Це дозволяє більш

ретельно контролювати процес диспергування кожного компоненту, забезпечуючи високий ступінь однорідності та відсутність агломератів у фінальному композитному електропровідному покритті.

Для покращення якості електропровідних композитних покриттів, необхідно здійснювати окреме виготовлення компонентів із подальшим їх ретельним змішуванням, використовуючи спеціалізоване обладнання для досягнення ефективної дисперсії та однорідності композиту. Оптимізація процесу виготовлення КЕП через окреме дроблення та гомогенізацію компонентів стане наступним кроком у нашій дослідницькій роботі, спрямованій на поліпшення властивостей електропровідних покриттів.

3.1.2 Дослідження роздільного змішування складових композитних електропровідних покриттів

З літературних джерел відомо про застосування методу роздільного змішування складових композитного покриття. Метод полягає у роздільному приготуванні розчину зв'язуючого. Та змочених наповнювачів або паст. Завдяки процесу змочування наповнювачів, витрати енергії на диспергування значно знижуються. Під час змочування розчинник вступає в контакт з поверхнею наповнювачів, як сажа чи графіт, що сприяє ефективному розподілу в композитній електропровідній суміші.

Електропровідний композитний розчин є результатом процесу змішування та диспергування різних компонентів. Найчастіше цей процес відбувається в розчині, де основні компоненти взаємодіють на молекулярному рівні, гарантуючи стабільність і однорідність електропровідному композиту. Хоча існує можливість змішування в сухому вигляді, але це менш поширено через комплексність контролю однорідності та якості отриманого матеріалу.

1) Для приготування розчину зі зв'язуючого використовували дисперсійну (дисольверну) мішалку, налаштовану на швидкість 300 обертів за хвилину, протягом 1,5 години. Після цього проводилося вимірювання вмісту

сухого залишку, що склав 10%, і контролювалася в'язкість за допомогою чашкового в'язкозіметра.

2) Процес змочування полярним розчинником, таким як спирт, виконувався у ємності, де сажа з графітом були ретельно змочені, а потім змішані до досягнення однорідної консистенції. Отримана таким чином суміш змоченого наповнювача є готовою сумішшю для подальших операцій.

3) Після процесу диспергування на спеціалізованому обладнанні, суміш перетворюється в пасту. Використання різних типів приладів для диспергування змоченого наповнювача дозволяє отримати пасту з потрібними властивостями.

4) При змішуванні пасти та розчину зв'язуючого за допомогою дисольвера (дисперсійної мішалки) утворюється електропровідний композитний розчин.

В попереднім розділі ми описали загальну схему приготування електропровідного композитного розчину. Методика приготування розчину зв'язуючого залишалася незмінною. Так само однаковим залишався процес змочування та усереднення електропровідного наповнювача для всіх варіантів приготування. Основною змінною в експериментах були саме методи диспергування змоченого електропровідного наповнювача та гомогенізація отриманих складових електропровідного композитного розчину.

У дослідженні для всіх видів приготування електропровідного композитного розчину використовувалася модельна рецептура, яка включала 60% графіту С0, 10% сажі ХС72 та 30% полімеру ПВБ.

В контексті цього дослідження, спроба використання дисольвера для диспергування суміші виявилася неефективною. Через високу в'язкість змоченого електропровідного наповнювача, цей метод не вважається підходящим, оскільки дисольвер не зміг ефективно обробити матеріал з такою високою в'язкістю.

В процесі дослідження для диспергування суміші використовувався тривалковий млин, де зазор між валками був налаштований до 20 мікрон. Це забезпечувало ефективне розбивання агломератів електропровідних наповнювачів до агрегатів, що є ключовим для створення якісної пасти. Процес диспергування на тривалковому млині зазвичай включав кілька етапів перетирання, у нашому випадку - п'ять, що дозволило досягнути оптимальної дисперсності та гомогенності наповнювачів у пасти. Якість пасти контролювалася за допомогою вимірювань сухого залишку.

Процес створення електропровідного композита розпочинається з виготовлення пасти електропровідного наповнювача на тривалковому млині. Цей метод дозволяє добитися ефективного розмелювання та однорідності наповнювача, забезпечуючи його кращу сумісність з матрицею. Окремо, на дисольвері готується розчин ПВБ. Коли обидва компоненти – паста електропровідного наповнювача та розчин ПВБ – будуть готові, вони змішуються за допомогою дисольвера для створення кінцевого електропровідного композитного розчину. рис. 3.8.

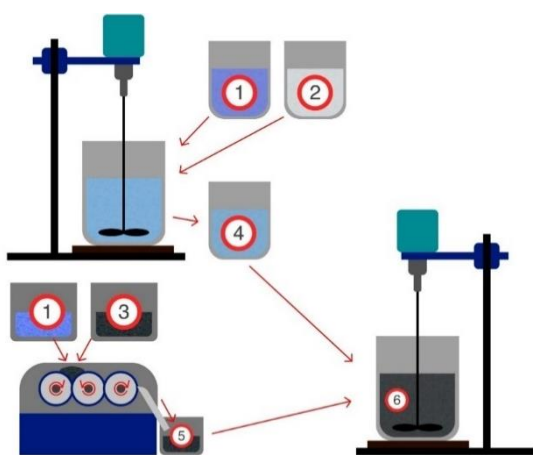


Рисунок 3.8 - Схема отримання електропровідного композитного розчину за допомогою тривалкового млина: 1- розчинник; 2- полімерна матриця; 3- електропровідний наповнювач; 4- розчин полімерної матриці в розчиннику; 5- диспергований електропровідний наповнювач у розчиннику(паста); 6-

електропровідний композитний розчин придатний для нанесення на субстрат.

Дослідженні зразки КЕП формувалися залежно від кількості перетирань на тривалковому млині. Після визначення сухого залишку, який складав 25%,

покриття наносилося вручну на ПЕТ-субстрат за допомогою ракельного аплікатора. Застосування методу ракельного нанесення дозволило створити композитні електропровідні покриття із початковою товщиною 50, 75 та 100 мікрон, які після сушіння зменшилися до 25, 30 та 35 мікрон відповідно.

Зразки сушили протягом 24 годин при температурі 25°C. Після завершення процесу сушіння було проведено вимірювання параметрів отриманих зразків КЕП. Результати дозволили встановити залежність опору покриття від кількості проведених перетирань на тривалковому млині, рис. 3.9.

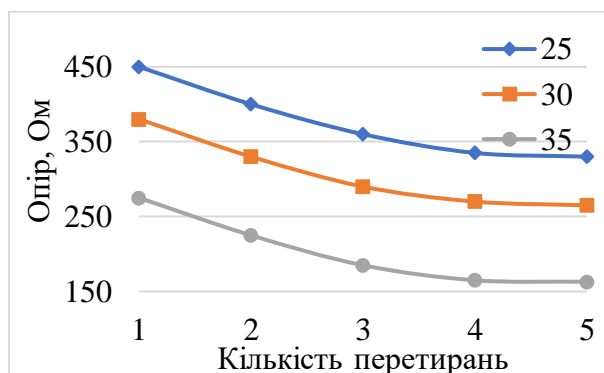


Рисунок 3.9 - Залежність опору від кількості перетирань для тривалкового млина, для різних товщин покриття.

Аналізуючи отримані результати, ми встановили, що товщина покриття суттєво впливає на електропровідність КЕП. Зокрема, після першого перетирання на тривалковому млині було зафіксовано нижчі показники опору, ніж при методі одночасного змішування всіх компонентів на дисольвері протягом 24 годин. Це свідчить про більшу ефективність процесу перетирання у порівнянні з простим змішуванням на дисольвері.

З кожним наступним перетиранням (другим та третім) показники опору продовжували знижуватися, свідчали про зменшення присутності агломератів. На четвертому та п'ятому перетиранні спостерігалася стабілізація опору, що вказує на ефективність диспергування сажі до стану агрегатів, хоча і залишалася незначна кількість агломератів.

Після п'яти перетирань зниження опору стало менш вираженим, але все ще продовжувалось. Отримані зразки містили агрегати значно меншого розміру та мінімальну кількість агломератів. У КЕП було зафіксовано якісну перколяцію, що є важливим фактором для функціональних властивостей покриття. Якість перетирання оцінювалася за допомогою гріндометра, який дозволяв точно виміряти ступінь дисперсності та розмір частинок у покритті.

Ці висновки допомогли нам визначити, що, хоча тривалковий млин є ефективним інструментом для поліпшення дисперсності та однорідності композиції, існує певний поріг ефективності, після досягнення якого подальші проходи не приносять значного вдосконалення продукту. Таке усвідомлення спонукало нас до подальшого дослідження альтернативних методів диспергування або модифікації існуючих процесів для досягнення бажаних електропровідних властивостей КЕП.

Однією з унікальних особливостей ступкового млина є можливість одночасного введення твердих компонентів та додавання рідини, у нашому випадку - спирту. Це не тільки сприяє більш ефективній дисперсії наповнювача, але й допомагає запобігати агломерації частинок, що є важливим для якості кінцевого продукту.

Особливістю цього процесу є його статистичний характер: оскільки частинки проходять через зазор не одночасно, не можна гарантувати однакове розмелення кожної частинки за один прохід.

На відміну від тривалкового млина, де процес проходження матеріалу через зазор більш контрольований, робота зі ступковим млином вимагає більше часу та уваги для забезпечення рівномірної дисперсії частинок. Хоча ступковий млин може працювати повільніше, ніж тривалковий, він забезпечує високоякісне змішування, що робить його відмінним вибором для застосувань, де потрібні висока дисперсність і однорідність покриття.

Наступний метод з використанням ступкового млина для створення електропровідного композиту передбачає кілька кроків. Першим кроком

необхідно отримати пасту електропровідного наповнювача за допомогою ступкового млина, де процес диспергування триває близько півгодини. Паралельно з цим на дисольвері готується розчин ПВБ. Після того, як паста електропровідного наповнювача та розчин ПВБ готові, вони змішуються разом на ступковому млину. Використання ступкового млина на обох етапах – і для отримання пасти, і для змішування компонентів – дозволяє досягти високої якості та однорідності кінцевого продукту рис. 3.10.

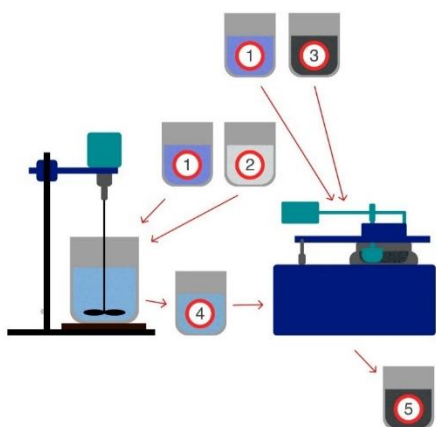


Рисунок 3.10 - Схема отримання електропровідного композитного розчину за допомогою ступкового млина: 1- розчинник; 2- полімерна матриця; 3- електропровідний наповнювач; 4- розчин полімерної матриці в розчиннику; 5- електропровідна фарба придатна для нанесення на субстрат.

У процесі дослідження було виконано відбір зразків кожні 30 хвилин. Після кожного відбору проводилась перевірка сухого залишку, а зразки наносилися вручну на ПЕТ-субстрат за допомогою ракельного аплікатора. Застосування ракельного методу нанесення дозволило створити КЕП з початковою товщиною 50, 75 та 100 мікрон, які після процесу сушіння зменшилися до 25, 30 та 35 мікрон відповідно.

Зразки сушилися протягом 24 годин при температурі 25°C. Після завершення сушіння були виміряні параметри отриманих зразків електропровідного композитного покриття. В результаті досліджень було встановлено залежність опору матеріалу від тривалості змішування, вираженої у годинах. Це дозволило зрозуміти, як час змішування впливає на електропровідні властивості кінцевого покриття рис. 3.11.

З аналізу отриманих результатів ми зробили важливі висновки. Виявлено не дуже значний вплив товщини покриття на ефективність електропровідності КЕП. Після першого півгодинного перетирання на ступковому млині було відзначено, що опір був нижчий, ніж при методі одночасного змішування всіх компонентів на дисольвері протягом 24 годин. Після двогодинного перетирання спостерігалось подальше зниження показників опору, що вказує на зменшену присутність агломератів.

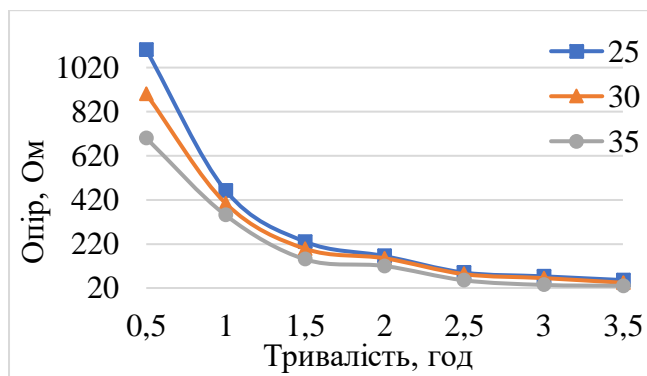


Рисунок 3.11 - Залежність опору від тривалості змішування для ступкового млина, для різних товщин покриття.

Незважаючи на факт диспергування сажі до стану агрегатів, була відмічена наявність певної кількості агломератів. Після 2,5 години перетирання на ступковому млині, зниження опору продовжувалося, але вже не так значно. Отримані зразки містили мілкі агрегати, що підтверджує ефективність процесу диспергування. У КЕП було досягнуто якісної перколяції та гомогенності електропровідного композиту. Якість перетирання оцінювали за допомогою гріндометра, що дозволило визначити рівень дисперсності частинок.

Отримані висновки з дослідження підкреслюють, що хоча ступковий млин ефективно покращує дисперсність та однорідність композиції, існує обмеження щодо часу обробки, яке впливає на швидкість виготовлення зразків. Виявлено, що після певного часу обробки на ступковому млині подальші проходи не приводять до значного покращення якості продукту. Це спонукало

до розгляду альтернативних методів диспергування, які можуть пропонувати більш ефективний баланс між якістю та швидкістю виробництва.

Наступна технологія створення електропровідного композитного розчину за допомогою ультразвукового дисперсера передбачає кілька етапів. Починається процес з отримання пасти електропровідного наповнювача за допомогою ультразвукового диспергатора. Це здійснюється протягом двох хвилин при потужності 400 ват та температурі 70°C, що забезпечує ефективне диспергування частинок. Паралельно з цим, на дисольвері готується розчин ПВБ.

Після того як паста електропровідного наповнювача та розчин ПВБ готові, вони змішуються разом на ультразвуковому диспергаторі. Цей крок є критичним для формування однорідного електропровідного композитного розчину. Використання ультразвукового диспергатора на обох етапах — як для створення пасти, так і для змішування компонентів — дозволяє досягти високої якості та ефективності кінцевого продукту рис. 3.12.

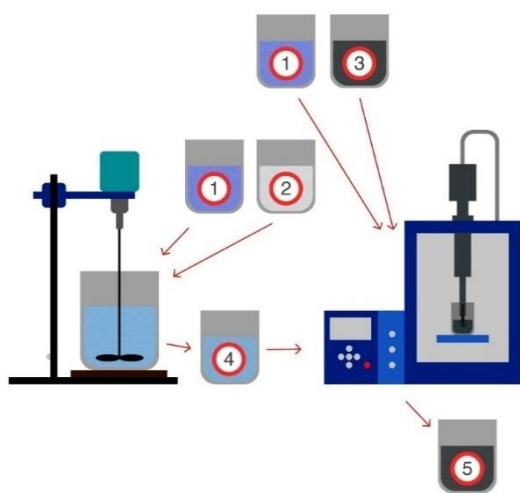


Рисунок 3.12 - Схема отримання електропровідного композитного розчину з допомогою ультразвукового диспергатора: 1- розчинник; 2- полімерна матриця; 3- електропровідний наповнювач; 4- розчин полімерної матриці в розчиннику; 5- електропровідна фарба придатна для нанесення на субстрат.

Під час дослідження, зразки були відібрані через кожні 2 хвилини, після чого перевірялися на вміст сухого залишку.. За допомогою методу ракульного нанесення були створені КЕП на ПЕТ субстраті з початковою товщиною 50, 75

та 100 мікрон, які після процесу сушіння зменшилися до 25, 30 та 35 мікрон відповідно.

Зразки сушилися протягом 24 годин при температурі 25°C. Після завершення процесу сушіння було виміряно параметри отриманих зразків КЕП. В результаті цих вимірювань було встановлено залежність опору матеріалу від часу змішування, вираженого в хвиликах. Це дозволило оцінити вплив тривалості змішування на електропровідні властивості кінцевого покриття рис. 3.13.

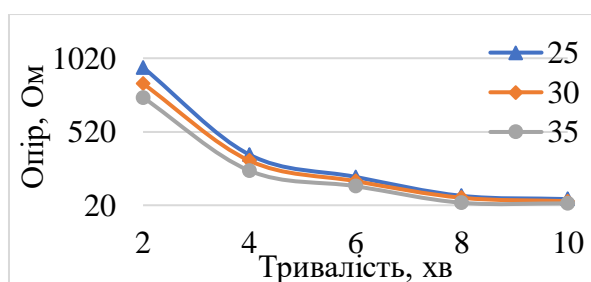


Рисунок 3.13 - Залежність опору від тривалості диспергування для ультразвукового диспергування, для різних товщин покриття.

З аналізу отриманих результатів, визначили важливі аспекти процесу утворення електропровідного композитного покриття. Виявлено, що товщина покриття має значний вплив на електропровідність. Зокрема, після перших двох хвилин обробки на ультразвуковому диспергаторі було зафіксовано трохи нижчі показники опору, ніж після використання планетарного млина протягом півгодини. Це свідчить про більшу ефективність ультразвукового диспергатора у порівнянні з планетарним млином.

Показники опору продовжували знижуватися протягом шести хвилин, свідчаючи про зменшення присутності агломератів. На восьмій хвилині опір стабілізувався, що вказує на ефективне диспергування сажі до стану агрегатів. Після десяти хвилин обробки падіння опору знижувалося поступово, але вже не так значно. Це дозволило отримати зразки з мілкими агрегатами у кінцевому

етапі диспергування. В полімерному композитному покритті була досягнута якісна перколяція та гомогенність електропровідного композита. Якість диспергування оцінювалася за допомогою гріндометра, що дозволило визначити ступінь дисперсності частинок у композиті.

Висновки вказують на те, що хоча ультразвуковий диспергатор ефективно поліпшує дисперсність та однорідність композиції, існує обмеження за часом, після досягнення якого подальше диспергування не приносить значного вдосконалення продукту.

На основі наших досліджень з'ясувалося, що перетирання на тривалковому млині ефективно покращує дисперсність і однорідність композитних покриттів, знижуючи їхній електричний опір. Використання планетарного млина та ультразвукової обробки також демонструє значний потенціал у поліпшенні якості дисперсії. Планетарний млин забезпечує інтенсивне розмелювання частинок, а ультразвукова обробка — високу ступінь дисперсії за допомогою кавітаційних ефектів, що є ключовим для електропровідних властивостей.

Однак, із зіткненням із обмеженнями за часом та вартістю, ми вирішили розглянути альтернативний метод, який дозволить оптимізувати процес, знижуючи при цьому витрати і скорочуючи час обробки. Наступний розділ дослідження зосередиться на вивченні іншого підходу до диспергування, які можуть бути ефективнішими в умовах виробництва, відходячи від методів, що використовують планетарний млин і ультразвукове обладнання.

3.1.3 Дослідження технології послідовного змішування полімерної матриці та диспергованого електропровідного наповнювача

У контексті нашого попереднього висновку про необхідність оптимізації диспергування для зниження витрат і підвищення ефективності, ми прагнемо застосувати роторний дисперсер у дослідженні. Цей метод використання дисперсера є привабливим завдяки його здатності швидко розбивати

агломерати і забезпечувати високу швидкість потоку рідини, що ефективно розсіює частинки в розчині. Така обробка сприяє створенню більш однорідної композитної структури, що є критично важливим для покращення електропровідних властивостей композиції.

При використанні дисперсера у процесах змішування необхідно враховувати особливості роботи з міцними полімерами, такими як ПВБ у порошковій формі. Через високу абразивність ПВБ, ризик механічних пошкоджень обладнання під час обробки значно зростає, особливо коли використовуються дисперсери з високошвидкісними роторами. Для зменшення цих ризиків, рекомендується використовувати ПВБ у вигляді спиртового розчину, що дозволяє знизити абразивні властивості матеріалу та спрощує процес диспергування.

Також важливо передбачити використання попередньо змочених, диспергованих наповнювачів, як-от сажа, що додатково захистить обладнання від можливих пошкоджень і забезпечить більш ефективне змішування. Це покращує загальну якість дисперсії і дозволяє уникнути додаткових механічних навантажень на дисперсер, забезпечуючи тривалу ефективність та довговічність обладнання.

Також важливо враховувати високі температури, які можуть виникати через інтенсивне фрикційне зіткнення, що може призвести до теплового сплавлення ПВБ, забруднення продукту і пошкодження обладнання. Тому, хоча дисперсери часто використовуються для створення емульсій та кремів, для ПВБ у порошковій формі вони можуть бути недоречними.

Водночас, змішування графіту з рідиною, наприклад спиртом, є менш агресивним до обладнання. Спирт виступає як транспортна рідина, знижуючи ризик термічного або механічного пошкодження ротора гомогенізатора. Така суміш може бути ефективно оброблена на високих швидкостях без значного зносу обладнання. Однак і тут потрібно дотримуватися оптимальних умов обробки.

Запропоновано технологію створення електропровідного композитного розчину включає кілька етапів. Початковий етап полягає у створенні пасти електропровідного наповнювача за допомогою тривалкового млина, де матеріал перетирається п'ять разів для досягнення потрібної дисперсності та однорідності. Паралельно з цим на дисольвері готується розчин ПВБ.

Після підготовки обох компонентів – пасти електропровідного наповнювача та розчину ПВБ – вони змішуються разом на дисперсері. Цей процес змішування триває 15 хвилин, що є важливим для формування якісного кінцевого електропровідного композитного розчину. Використання дисперсера на цьому етапі дозволяє добитися рівномірного поєднання обох компонентів, забезпечуючи однорідність і високу якість кінцевого продукту рис. 3.14.

Відбирали зразки кожні 2 хвилини для аналізу сухого залишку та подальшого нанесення на ПЕТ за допомогою ракульного аплікатора. Застосування методу ракульного нанесення дозволило створити композитні електропровідні покриття з початковою товщиною 50, 75 та 100 мікрон, які після процесу сушіння скоротилися до 25, 30 та 35 мікрон відповідно.

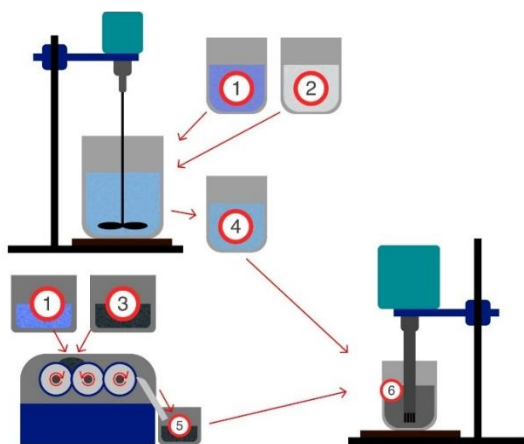


Рисунок 3.14 - Схема отримання електропровідного композитного розчину за допомогою дисперсера: 1- розчинник; 2- полімерна матриця; 3- електропровідний наповнювач; 4- розчин полімерної матриці в розчиннику; 5- деспергований електропровідний наповнювач у розчиннику; 6- електропровідна фарба придатна для нанесення на субстрат.

Зразки піддавались сушінню протягом 24 годин при температурі 25°C. Після завершення сушіння було проведено вимірювання отриманих зразків

КЕП. В результаті цих вимірювань було встановлено залежність опору від тривалості змішування, виражену в хвиликах. Ці дані допомагають зрозуміти, як час диспергування впливає на електричні властивості КЕП рис. 3.15.

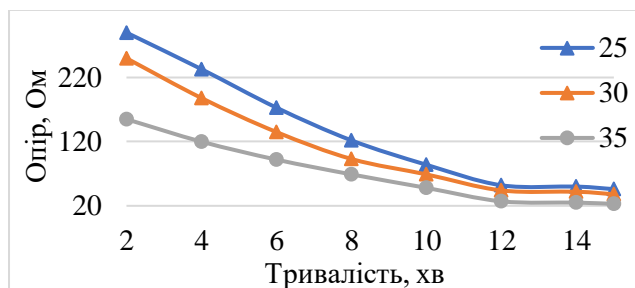


Рисунок 3.15 - Залежність опору від тривалості диспергування для тривалкового млина з використанням дисперсера, для різних товщин покриття.

З аналізу отриманих результатів. Виявили, що товщина покриття має великий вплив на електропровідність КЕП. Завдяки використанню дисперсера отримали значно нижчі показники опору порівняно з ультразвуковим дисперсером. Відмітили, що показники опору поступово знижувалися протягом дванадцяти хвилин диспергування, але після цього часу зменшення опору ставало менш вираженим.

Це вказує на несуттєву присутність мілких агрегатів і ефективність диспергування сажі до стану мілких агрегатів та дрібних часток. Після дванадцяти хвилин диспергування на дисперсері, спостерігалось лише незначне подальше зниження опору. Зразки, отримані в кінці процесу диспергування, містили агрегати та характеризувалися якісною перколяцією та гомогенністю електропровідного композиту. Якість диспергування оцінювалася за допомогою гріндометра, що дозволило оцінити розмір частинок і ступінь їх розподілу в композиті.

Аналіз результатів вимірювань опору, що виникають під час процесу диспергування, дійсно дозволяє нам зробити важливі висновки. Порівнюючи дані з різних методів приготування електропровідних композитних розчинів,

ми встановили, що метод, використаний нами, показав найнижчі значення опору порівняно з іншими розглянутими системами. Це свідчить про високу ефективність та оптимальність нашого підходу рис.3.16.

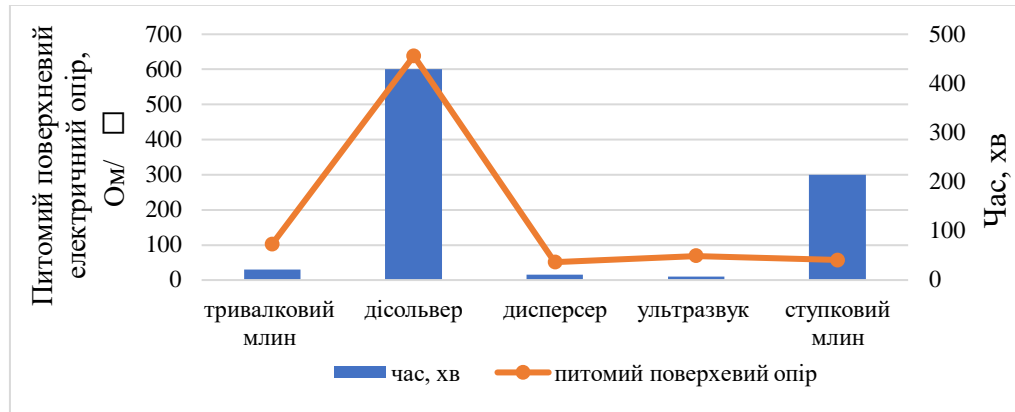


Рисунок 3.16 – Залежність питомого опору від часу диспергування для обраного устаткування.

Необхідно підкреслити, що цей метод не тільки є найефективнішим у плані досягнення бажаних електропровідних характеристик, але й виявився найбільш економічно вигідним. Це робить його особливо привабливим для застосування у масовому виробництві, де критично важливо знайти баланс між вартістю виробництва та якістю кінцевого продукту.

Крім того, обраний метод дозволяє значно скоротити час приготування композитного електропровідного розчину, що є важливим для промислового виробництва, де час є ключовим фактором. Зниження часу приготування не тільки підвищує продуктивність, але й сприяє зниженню енергетичних витрат та вартості виробництва.

Отже, обраний метод диспергування виявився ефективним рішенням, яке вдало поєднує ефективність, економічність та швидкість - ключові параметри для сучасного масового виробництва електропровідних композитних розчинів.

3.2 Дослідження технології аплікації електропровідних композитних покриттів

В рамках нашого дослідження ми вивчали технології створення електропровідного композитного розчину(фарби) для електропровідних композитних покриттів, приділяючи особливу увагу етапу аплікації фарби на поверхню(субстрат) [255]. Серед різноманітних методів були застосовані ракельні аплікатори двох типів: регульований та нерегульований. Регульований аплікатор надавав можливість з точністю контролювати товщину нанесеного покриття, що важливо для досягнення певних характеристик електропровідності та механічної міцності покриття. Нерегульований аплікатор, у свою чергу, забезпечував швидкість нанесення, сприяючи оптимізації виробничого процесу.

Окрім ракельних аплікаторів, був використаний роликівий метод з анілоксовим валом, що дозволяє досягти високої рівномірності покриття завдяки мікроскопічним коміркам на поверхні валу. Цей метод підходить для масового виробництва КЕП, оскільки він забезпечує швидке та ефективне нанесення покриття на великі площі.

При вивченні технологій нанесення КЕП особливу увагу приділено ракельному та роликівому методам з анілоксовим валом, а також методу розпилення з аерографа. Ракельний метод передбачає нанесення фарби на підготовлений субстрат за допомогою ракеля, є інструментом для рівномірного розподілу покриття. У використанні регульованого ракеля можливо точно контролювати товщину покриття, а нерегульований варіант забезпечує швидкість нанесення. Після виливання фарби на субстрат ракель рівномірно розподіляє її, забезпечуючи однорідний шар з заданою товщиною, після чого відбувається процес сушіння.

Роликівий метод з анілоксовим валом імітує друкарський процес і ідеально підходить для масового виробництва. Анілоксовий вал з

мікроскопічними комірками заповнюється фарбою, а потім фарба переноситься на субстрат, формуючи покриття. Задана швидкість руху валу забезпечує рівномірне покриття.

Метод розпилення з аерографа включає в себе нанесення фарби за допомогою фінішного розпилення. Фарба під тиском проходить через аерограф, що дозволяє отримати дуже тонке і рівномірне покриття, ідеально підходяще для складних по формі поверхонь та для досягнення високої деталізації покриття. Розпилення може варіюватися від великої площі до точкового нанесення, забезпечуючи високу адгезію та однорідність шару. Цей метод вимагає ретельного контролю параметрів розпилення та вентиляції приміщення для ефективного відведення розчинників та уникнення осідання пилу на нанесене покриття.

При нанесенні покриттів різними методами важливо контролювати специфічні параметри для кожного з них, щоб забезпечити якість та рівномірність покриття.

Для ракельного методу ключовими параметрами є зазор між ракелем та субстратом та швидкість переміщення ракеля. Зазор впливає на товщину покриття: менший зазор призводить до тоншого шару, в той час як більший зазор дасть товщий шар. Швидкість переміщення ракеля повинна бути достатньою для того, щоб фарба рівномірно розподілялась, але не настільки швидкою, щоб не залишалися стежки.

При використанні роликового аплікатора з анілоксовим валом важливими параметрами є глибина та відстань комірок на валу, які визначають кількість фарби, що буде перенесена, та швидкість обертання валу, що впливає на рівномірність нанесення покриття. Відповідне налаштування цих параметрів забезпечить однорідне нанесення без переповнення або недостатнього заповнення комірок

Для методу розпилення з аерографа визначальними параметрами є діаметр сопла, відстань від сопла до поверхні, швидкість розпилення та

витрата повітря. Діаметр сопла впливає на розмір крапельок фарби та ширину струменя. Відстань до поверхні визначає зону покриття та можливу товщину шару: чим ближче сопло до поверхні, тим товще може бути шар. Швидкість розпилення та витрата повітря повинні бути скоординовані таким чином, щоб фарба не розтікалася і не створювала крапель, але при цьому покривала весь заданий об'єкт. Витрата повітря має бути достатньо високою для створення стабільного розпилення, але не настільки високою, щоб фарба висихала до того, як встигне осісти на поверхні.

Результат нанесення композитного покриття, в тому числі товщина та орієнтація дисперсних частинок у покритті, суттєво залежить від обраної технології аплікації та фізичних властивостей компонентів покриття.

Ракельний метод, при нанесенні покриття ракельним методом можлива висока точність контролю товщини покриття. Однак, оскільки ракель тисне на покриття і рухається по поверхні, він може вплинути на орієнтацію плоских частинок, наприклад графіту. Плоскі частинки під впливом тиску ракеля можуть орієнтуватися паралельно поверхні субстрату, що може бути корисним для створення анізотропних властивостей покриття, наприклад, для покращення електропровідності в певному напрямку.

Роликовий аплікатор з анілоксовим валом, ця технологія також може впливати на орієнтацію частинок. Анілоксові вали забезпечують рівномірне нанесення фарби, але через механічний контакт з валом, можлива часткова орієнтація частинок, особливо якщо вони мають плоску форму. В процесі перенесення покриття з валу на субстрат, частинки можуть вирівнюватися у плоскому напрямку.

Метод розпилення з аерографа, цей метод дає більше можливостей для створення однорідних покриттів з випадково орієнтованими частинками. Під час розпилення, дрібні частинки фарби не піддаються значному механічному впливу, що знижує ймовірність їх орієнтації під час нанесення. Це може бути

корисним для створення ізотропних покриттів, коли властивості покриття повинні бути однаковими в усіх напрямках.

Зазначимо, що фізико-хімічні процеси сушіння чи полімеризації також можуть впливати на остаточну орієнтацію та розташування дисперсних частинок. Тому, важливо контролювати не тільки нанесення покриття, а й умови його висихання та отвердіння.

3.2.1 Дослідження анізотропії властивостей композитних електропровідних покриттів

Для точного оцінювання ступеня орієнтації частинок у композитному покритті може бути використане вимірювання опору, отримане за допомогою 4 електродного метода вимірювання. Таке тестування дозволяє не тільки визначити орієнтацію частинок після процесу нанесення, але й зрозуміти, як різні методи нанесення впливають на кінцеві властивості покриття. Це знання може бути використане для оптимізації процесів нанесення та створення покриттів із спеціалізованими властивостями, враховуючи конкретні застосування.

Ракельний метод, при нанесенні покриття ракелем, орієнтація частинок визначається в основному зазором між ракелем і субстратом, а також швидкістю переміщення ракеля. Вузкий зазор та висока швидкість можуть спричинити більш виражену паралельну орієнтацію частинок до поверхні субстрату. Така орієнтація може покращити провідні властивості вздовж поверхні. Аналіз питомих показників опору може допомогти виявити, як саме ці фактори впливають на орієнтацію частинок, дозволяючи налаштувати процес для отримання оптимального результату табл. 3.1.

Нанесення композитного покриття за допомогою ракельного аплікатора також забезпечує орієнтацію частинок, але вона менш виражена порівняно з роликівим методом. Вплив на орієнтацію визначається зазором між ракелем і

субстратом, а також швидкістю переміщення ракеля. Цей метод може бути корисний у випадках, де потрібна менш строга орієнтація частинок.

Таблиця 3.1

Рецептурний склад полімерної композиції

Склад	Вміст компоненту мас. %
ПВБ	30
Графіт С0	50
Сажа ВР2000	20
Властивості вздовж нанесення	
Значення	
Товщина, мкм	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	83,52
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,29
Властивості поперек нанесення	
Значення	
Товщина, мкм	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	87,34
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,31

Також були зроблені знімки за допомогою електронної мікроскопії для детального вивчення впливу типу нанесення ракельного аплікатора на розподіл та орієнтацію частинок у композитному покритті. Це дозволило глибше аналізувати мікроструктурні зміни, що відбуваються внаслідок процесу нанесення рис. 3.17.

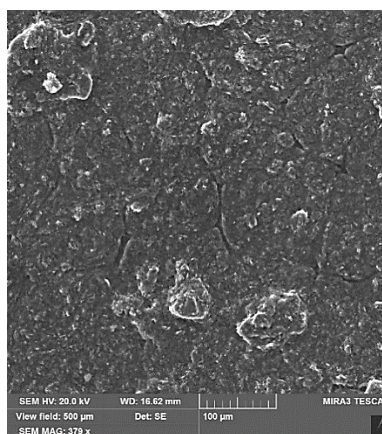


Рисунок 3.17 - СЕМ зображення структури поверхні КЕП після висихання тип аплікації ракельний аплікатор.

Електронно-мікроскопічне зображення структури КЕП після висихання. Отримано угруповання з типовими кракелюрними візерунками, діаметр яких досягає 100 мікрон. Ймовірно обумовлено стягуванням КЕП при полімеризації верхнього шару покриття.

Роликовий метод з анілоксовим валом, у випадку роликового нанесення, орієнтація частинок залежить від форми і розміру комірок валу. Аналізу питомих показників опору може показати, чи сприяють ці ячейки вертикальній або горизонтальній орієнтації частинок. Оптимізація геометрії анілоксового валу може бути націлена на досягнення більшої орієнтації частинок, що підвищує однорідність електропровідності КЕП табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Рецептурний склад полімерної композиції

Склад	Вміст компоненту мас. %
ПВБ	30
Графіт С0	50
Сажа ВР2000	20
Властивості вздовж нанесення	Значення
Товщина, мкм	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	61,14
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,21
Властивості поперек нанесення	Значення
Товщина, мкм	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	66,24
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,22

При використанні роликового аплікатора з анілоксовим валом видно за результатом вимірювання питомих показників опору виражена орієнтація частинок в композитному покритті. Ця орієнтація впливає на питомий електричний опір, як виявлено з показників. Геометрія комірок валу сприяє більш упорядкованому розташуванню частинок, що забезпечує покращення електропровідності по поверхні покриття. Такий метод є ефективним для

створення композитних покриттів із покращеними провідними властивостями. Знімки, отримані за допомогою електронної мікроскопії, чітко ілюструють, як метод нанесення впливає на розподіл частинок у КЕП. Ці зображення допомогли глибше зрозуміти зміни, які виникають в процесі нанесення рис.3.18.

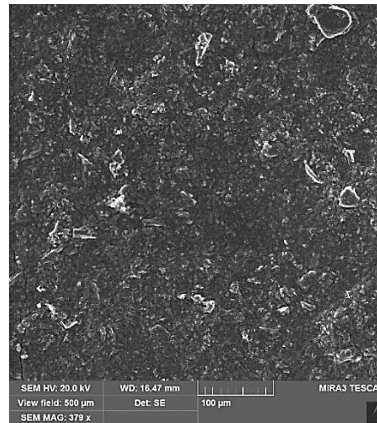


Рисунок 3.18 - СЕМ зображення структури поверхні КЕП після висихання тип аплікації роликів аплікатор з анілоксовим валом.

Метод розпилення розпилювачем, розпилення зазвичай веде до випадкової орієнтації частинок через високу динаміку процесу і відсутність контрольованого напрямку руху. Мета дослідження полягає у визначенні, як отримане розміщення частинок у композиті впливає на ізотропні електропровідні властивості табл. 3.3.

Знімки, зроблені за допомогою електронної мікроскопії, чітко демонструють, як метод нанесення розпилення впливає на розподіл та орієнтацію частинок у КЕП рис.3.19.

Під час створення КЕП методом розпилення ми спостерігаємо формування нетканих матеріалів на верхньому шарі КЕП. Також відзначається досить щільне групування нижнього шару, яке має складну та нерівномірну поверхню. Опір матеріалу залишається майже незмінним вздовж та поперек нанесення, що свідчить про ізотропні властивості електропровідності КЕП.

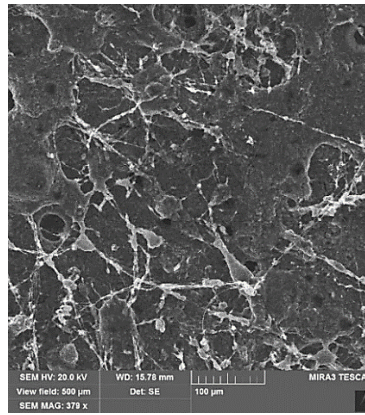


Рисунок 3.19 - СЕМ зображення структури поверхні КЕП після висихання тип аплікації розпилення.

Таблиця 3.3

Рецептурний склад полімерної композиції

Склад	Вміст компоненту мас. %
ПВБ	30
Графіт С0	50
Сажа ВР2000	20
Властивості вздовж нанесення	Значення
Товщина, мкм	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	73,43
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,26
Властивості поперек нанесення	Значення
Товщина, мкм	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	74,18
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,26

Метод розпилення розпилювачем характеризується випадковою орієнтацією частинок у композитному покритті. Через високу динаміку процесу і відсутність контрольованого напрямку руху частинок, цей метод найменше сприяє упорядкованому розташуванню частинок. Відповідно, таке нанесення покриття може бути більш придатним для застосувань, де ізотропні електропровідні властивості є менш критичними.

З проведених досліджень щодо орієнтації частинок на субстраті при різних методах нанесення вказує на значні відмінності в електричному опорі,

вздовж та поперек аплікації, що безпосередньо пов'язано з орієнтацією частинок в КЕП рис 3.20.

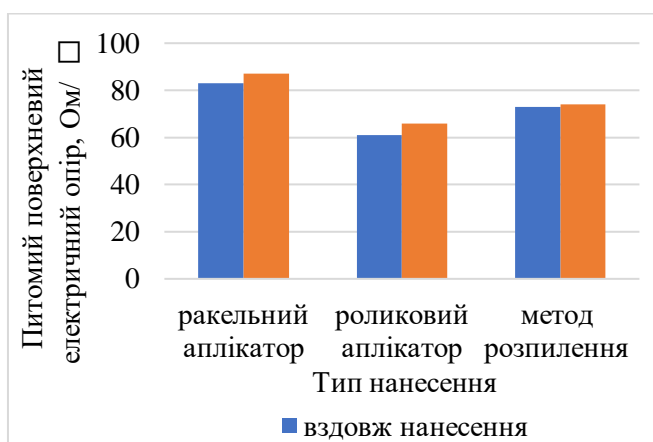


Рисунок 3.20 – Анізотропні властивості опору при різних методах аплікації.

Що стосується анізотропії, методи аплікації суттєво впливають на ці властивості. Роликівий метод з анілоксовим валом дозволяє створювати покриття з анізотропними електропровідними властивостями, забезпечуючи високу рівномірність товщини та орієнтації частинок.

В підсумку, хоча існує потенційна можливість досягти подібних результатів різними методами аплікації, вибір методу часто залежить від специфічних вимог до покриття, включаючи властивості матеріалу, необхідну товщину та електропровідність, а також вартість і швидкість процесу. За допомогою тестування питомих показників електропровідності можна оптимізувати кожен із цих методів для досягнення ефективних результатів.

При нанесенні роликівий аплікатором з анілоксовим валом було зафіксовано значну анізотропію опору вздовж та поперек напрямку, що впливає на питомі показники опору. Форма та розмір комірок валу сприяють більш вираженій орієнтації частинок, що підвищує однорідність електропровідності покриття вздовж поверхні субстрату.

При використанні ракельного аплікатора також спостерігається орієнтація частинок, але вона менш виражена порівняно з роликовим аплікатором з анілоксовим валом.

У випадку нанесення покриття методом розпилення спостерігається лише незначна орієнтація частинок. Це пояснюється високою динамікою процесу та відсутністю контрольованого напрямку руху частинок. Незважаючи на потенційну можливість оптимізації параметрів сопла для досягнення більш упорядкованої орієнтації, розпилення аерографом зазвичай не сприяє орієнтації частинок, що відображається у питомих показниках електричного опору.

Отже, метод нанесення має значний вплив на орієнтацію частинок у композитному покритті. Роликовий аплікатор з анілоксовим валом демонструє найбільшу ефективність у досягненні орієнтованих частинок, тоді як ракельний аплікатор та розпилення надають менш виражену орієнтацію.

3.2.2 Дослідження впливу субстратів на властивості композитних електропровідних покриттів

При виборі методу нанесення композитного покриття важливо враховувати тип субстрату, оскільки він має істотний вплив на орієнтацію і розподіл частинок у покритті. Наприклад, гладкі та непористі ПЕТ-плівки сприяють упорядкованій орієнтації частинок, особливо коли застосовується ракельний метод, де точне регулювання зазору і швидкості можуть формувати анізотропні властивості покриття. З іншого боку, папір може варіювати за пористістю і гнучкістю, що може призвести до менш передбачуваної орієнтації, особливо при використанні менш контрольованих методів нанесення, як розпилення.

Розглянемо вплив ПЕТ субстрату та ракельного нанесення на електропровідність табл. 3.4.

Рецептурний склад полімерної композиції

Склад	Вміст компоненту мас. %		
ПВБ	30		
Графіт С0	50		
Сажа ВР2000	20		
Властивості	Товщина, мкм		
	25	30	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	1802,62	1456,13	941,22
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	4,51	4,37	3,30

У ході експерименту використовували метод ракельного нанесення для створення покриття на ПЕТ плівці з початковими товщинами 50, 75 та 100 мікрон. Після процесу сушіння фінальні товщини покриття скоротилися до 25, 30 та 35 мікрон відповідно. Дослідження показали, що питомий поверхневий опір при товщині покриття 25 мікрон становив 1802,62 Ом, при 30 мікронах - 1456,13 Ом, і при 35 мікронах - 941,22 Ом. Щодо питомого об'ємного опору, то при товщині 25 мікрон він складав 4,51 Ом*см, при 30 мікронах - 4,37 Ом*см, а при 35 мікронах - 3,30 Ом*см. Ці результати вказують на те, що зі збільшенням товщини покриття спостерігається зниження як питомого поверхневого, так і об'ємного опору.

Розглянемо вплив Паперу як субстрату та роликового аплікатора з анілоксовим валом як вид нанесення та розглянемо вплив на електропровідність табл. 3.5.

У цьому експерименті застосовували роликовий аплікатор з анілоксовим валом для нанесення покриття на паперовий субстрат. Були досліджені товщини покриття 35, 60, та 70 мікрон. Результати показали, що питомий поверхневий опір при товщині покриття 35 мікрон становив 61,14 Ом, при 60 мікронах - 42,03 Ом, і при 70 мікронах - 39,87 Ом. Що стосується питомого

об'ємного опору, то при товщині 35 мікрон він був 0,21 Ом*см, при 60 мікронах - 0,25 Ом*см, а при 70 мікронах - 0,28 Ом*см.

Таблиця 3.5

Рецептурний склад полімерної композиції

Склад	Вміст компоненту мас. %		
ПВБ	30		
Графіт С0	50		
Сажа ВР2000	20		
Властивості	Товщина, мкм		
	35	60	70
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	61,14	42,03	39,87
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,21	0,25	0,28

Ці результати свідчать про те, що зі збільшенням товщини покриття відбувається зниження питомого поверхневого опору, але зростання питомого об'ємного опору.

Порівняння показників питомого опору для покриття товщиною 35 мікрон на плівковому та паперовому субстратах показує великі відмінності рис. 3.21.

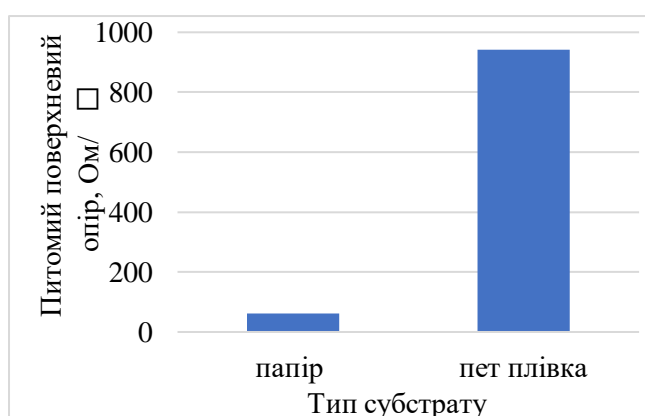


Рисунок 3.21 - Питомий поверхневий опір на різних типах субстратів.

На плівковому субстраті питомий поверхневий опір складає 941,22 Ом, а питомий об'ємний опір - 3,29 Ом*см. У той час як для паперового субстрата

питомий поверхневий опір - лише 61,14 Ом, а питомий об'ємний опір - 0,21 Ом*см. Це демонструє, що паперовий субстрат значно краще підходить для отримання якісних електропровідних властивостей КЕП.

Пористий папір чи ватман абсорбують більше розчинника, змінюючи в'язкість покриття, що може впливати на розподіл частинок і приводити до випадкової орієнтації. Роликовий метод з анілоксовим валом може допомогти утримати рівномірність розподілу на пористих матеріалах, але важливо звернути увагу на геометрію та розміри комірок валу для досягнення оптимальних результатів.

Визначення питомих показників електричного опору, може бути використане для оцінки впливу субстрату на орієнтацію частинок, допомагаючи оптимізувати параметри нанесення для конкретного типу субстрату і бажаного результату покриття. Це дозволяє вибирати найефективніші комбінації субстратів і методів аплікації для створення покриттів з потрібними властивостями.

Інші методи аплікації, такі як використання валика або пензлика, можуть бути менш рівномірними і точними, проте в деяких випадках вони все ще застосовні, зокрема для роботи з складними поверхнями. Використання валика може призвести до нерівномірності товщини покриття, що в свою чергу впливає на електропровідність.

За результатами досліджень і тестувань, роликовий аплікатор з анілоксовим валом зазвичай забезпечує кращу рівномірність і контроль товщини покриття, що є критичним для електропровідності. Також роликовий аплікатор з анілоксовим валом може бути використаний для багат шарового нанесення, що дозволяє досягнути потрібної товщини і властивостей покриття з більшою точністю.

3.2.3 Методи нанесення адаптовані до фізичних властивостей фарби і субстратів

У процесі нанесення покриттів на різні субстрати, як ПЕТ плівку в'язкість фарби відіграє ключову роль. Розглянемо, як методи нанесення адаптуються до полімерних композитів.

Ракельний метод є ідеальним для більш густої фарби, дозволяючи створити тонкий і рівномірний шар на субстраті. Цей метод часто використовується, коли потрібно досягнути високої точності і відтворення деталей на поверхні.

Роликовий метод з анілоксовим валом віддає перевагу рідким до середньої в'язкості фарбам. Анілоксовий вал забезпечує рівномірне покриття і є аналогом промислових друкарських машин, що робить його ефективним для великомасштабних застосувань.

ПЕТ плівка вимагає попередньої обробки для забезпечення адгезії. Папір дуже добре поглинає фарбу, хоча може виявитися занадто пористим для дуже рідких розчинів.

Для вибору методу і в'язкості фарби потрібно враховувати тип субстрату, бажану товщину та рівномірність покриття, а також властивості самої фарби. Універсального підходу не існує, і кожен варіант вимагає індивідуального налаштування, щоб досягти бажаних характеристик покриття, як-от електропровідність, анізотропія чи ізотропія, і звичайно, рівномірність товщини покриття.

При нанесенні покриттів на паперовий субстрат, основною проблемою є його висока пористість, що сприяє швидкому поглинанню розчинників, наприклад, спирту. Це призводить до того, що полімерна матриця може залишитися на поверхні, в той час як спирт проникає в глиб паперу, що може призвести до нерівномірності покриття. У той же час, на плівковому субстраті, як ПЕТ, така проблема зазвичай не виникає, і можливо нанести товщі і більш рівномірні покриття.

Роликовий аплікатор з анілоксовим валом метод використовується для нанесення декількох шарів покриття, оскільки він дозволяє повторне нанесення без ризику пошкодити попередній шар. Це становить перевагу перед ракельним методом, де повторне нанесення може бути проблематичним через високу вірогідність зняття чи пошкодження вже нанесеного шару.

У промислових умовах, особливо на друкарських машинах, можливо налаштувати кілька секцій для послідовного нанесення різних шарів. Це дозволяє нанести базовий шар, який після висушування може бути покритий додатковими шарами. Такий підхід значно підвищує рівномірність покриття та скорочує час виробництва табл. 3.6.

Таблиця 3.6

Рецептурний склад полімерної композиції

Склад	Вміст компоненту мас. %
ПВБ	30
Графіт С0	50
Сажа ВР2000	20
Властивості	Значення
Товщина, мкм	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	61,14
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,21

Коли робота виконується вручну, виникають певні обмеження, такі як неоднорідність покриття та обмежена можливість повторного нанесення без пошкодження. Однак, перенесення цього процесу на автоматизовану друкарську машину з декількома секціями може допомогти вирішити ці проблеми, забезпечивши високий рівень контролю та повторюваності, а також здатність до швидкої і рівномірної аплікації покриттів табл. 3.7.

Нанесення покриття за допомогою ракеля зазвичай використовується для створення тонких шарів. Ракель дозволяє точно контролювати товщину покриття, що є критично важливим для додатків, де необхідні висока точність

та однорідність плівки. Цей метод ефективний для матеріалів, які потребують швидкого та ефективного нанесення тонкого покриття.

Таблиця 3.7

Рецептурний склад полімерної композиції

Склад	Вміст компоненту мас. %
ПВБ	30
Графіт С0	50
Сажа ВР2000	20
Властивості	Значення
Товщина, мкм	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	103,32
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,36

Проте, якщо потрібно нанести товщий шар, ракель може бути не найкращим інструментом, оскільки це може призвести до проблем із рівномірністю покриття. У цьому випадку роликові аплікатори стають більш переважними, оскільки вони здатні наносити товстіші та більш однорідні шари. Роликове нанесення добре працює на широкому спектрі субстратів і часто використовується у промисловості завдяки його здатності до швидкого та рівномірного нанесення табл. 3.8.

Таблиця 3.8

Рецептурний склад полімерної композиції

Склад	Вміст компоненту мас. %
ПВБ	30
Графіт С0	50
Сажа ВР2000	20
Властивості	Значення
Товщина, мкм	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	83,52
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,29

Метод розпилення дозволяє створити тонкі та рівномірні покриття і часто використовується, коли необхідно домогтися однорідної плівки на великих або складних поверхнях. Цей метод може бути налаштований для нанесення різноманітних матеріалів, включаючи розчини, що містять електропровідні частинки. Тим не менш, ізотропні властивості електропровідності можуть бути нижчими порівняно з покриттями, нанесеними іншими методами, оскільки орієнтація частинок може бути більш випадковою табл. 3.9.

Таблиця 3.9

Рецептурний склад полімерної композиції

Склад	Вміст компоненту мас. %
ПВБ	30
Графіт С0	50
Сажа ВР2000	20
Властивості	Значення
Товщина, мкм	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	73,42
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,26

Нанесення пензликом є найбільш простим і традиційним методом, але воно не забезпечує таку ж рівномірність і точність, як машинні методи. Пензлик може залишати сліди або штрихи, і контроль за товщиною покриття є складнішим. Цей метод часто використовується для прототипування або у випадках, де високий рівень точності не є вирішальним.

Ракельний аплікатор використовується для створення покриттів із високою ступенем контролю товщини. Точне налаштування товщини покриття робиться через регулювання зазору між ракелем та субстратом. Ось як можливо досягти точності товщини за допомогою ракеля.

Спочатку проводиться нанесення пробного покриття та вимірювання сухої товщини за допомогою мікрометра або іншого точного приладу для вимірювання покриттів.

На основі отриманої товщини зазор між ракелем та субстратом коригується, щоб відрегулювати товщину покриття. Це може включати підняття або опускання ракеля, зміну кута нахилу або тиску на ракель.

Якщо необхідно, проводиться коригування сухого залишку у фарбі. Це може бути зроблено шляхом зміни концентрації сухих компонентів або розчинника у покритті.

Після коригувань проводиться ще одне пробне нанесення для перевірки товщини. Процес коригування повторюється до тих пір, поки не буде досягнуто бажаної товщини покриття.

У випадку використання роликового аплікатора, відтворення товщини покриття є більш складним, оскільки товщина шару, який наноситься, може варіюватися в залежності від багатьох факторів, включно з в'язкістю матеріалу, тиском на вал, швидкістю нанесення та однорідністю субстрату.

Роликовий аплікатор часто використовується для нанесення товстих або багат шарових покриттів, де точність товщини кожного шару є менш критичною, або коли потрібне швидке нанесення на великі площі.

Таким чином, для досягнення високої точності і відтворюваності товщини покриття ракельні аплікатори вважаються більш підходящими, особливо у виробничих процесах, де необхідне точне регулювання товщини. Цей метод дозволяє детально контролювати параметри покриття та швидко адаптуватися до змін у вимогах до продукції.

У нашому випадку, роликовий метод було обрано як оптимальний для подальших досліджень на основі кількох ключових показників.

Роликові аплікатори забезпечують можливість нанесення покриттів різної товщини, в тому числі багат шарових, що є важливим для експериментів, де потрібно змінювати властивості матеріалу шляхом

модифікації товщини покриття. Рівномірне нанесення також забезпечує більшу однорідність електропровідних шарів.

Роликовий метод може забезпечити ізотропні властивості покриття, коли властивості матеріалу є однаковими у всіх напрямках. Це може бути важливо для додатків, де необхідна однорідна електропровідність.

Нанесення багат шарових покриттів роликом зазвичай дає можливість більш рівномірно контролювати товщину кожного шару. Це особливо важливо, коли мова йде про виготовлення високоточних покриттів, що впливають на функціональні властивості кінцевого продукту.

Роликовий метод вирізняється своєю здатністю імітувати промислове виробництво, оскільки він дозволяє застосувати аналогічні технології та процеси, які використовуються в масовому виробництві. Таке обладнання зазвичай включає в себе можливості швидкої зміни товщини шарів, швидкості нанесення та навіть типів покриттів без потреби в ручному втручанні, забезпечуючи високу повторюваність та якість.

3.2.4 Оцінка адгезії композитних електропровідних покриттів до субстрату

Для оцінки адгезії покриттів до субстратів використовують різні методи, серед яких є метод адгезивної стрічки та метод подряпування. Обидва ці методи дозволяють визначити міцність зчеплення між покриттям і субстратом, що є ключовим для забезпечення довговічності матеріалів.

Почнемо з методу адгезивної стрічки для оцінки модельної рецептури КЕП. Цей процес включає нанесення спеціальної клейкої стрічки на висушене покриття, після чого стрічку щільно притискають, а потім різко зривають з поверхні. Якщо покриття частково або повністю залишається на субстраті, це вказує на хорошу адгезію. У протилежному випадку, якщо покриття відділяється разом із стрічкою, адгезія вважається недостатньою.

Оцінка кількості залишеного покриття на субстраті дозволяє встановити якість адгезії рис. 3.22.



Рисунок 3.22 - Оцінка адгезії покриттів до субстрату метод адгезивної стрічки.

Після проведення тесту на адгезію з використанням адгезивної стрічки для покриття товщиною 50 мікрон, результати показали, що покриття не відділилося від ПЕТ субстрату. Це свідчить про високу якість адгезії.

Для оцінки модельної рецептури КЕП. Метод виконується за допомогою інструмента, який створює контрольовані подряпування на поверхні покриття. Прилад для цього методу часто оснащений алмазним наконечником, що дозволяє точно регулювати глибину та ширину подряпин. Покриття, що витримує ці подряпування без значної втрати зчеплення з субстратом, має високу адгезію. Вимірювання та аналіз подряпувань допомагають оцінити здатність покриття чинити опір механічним пошкодженням рис. 3.23.

Результат показав, що при тестуванні 50-мікронного покриття не відокремилася від ПЕТ субстрата, свідчать про високу якість адгезії. Це означає, що КЕП володіє достотною міцністю зчеплення з основою.

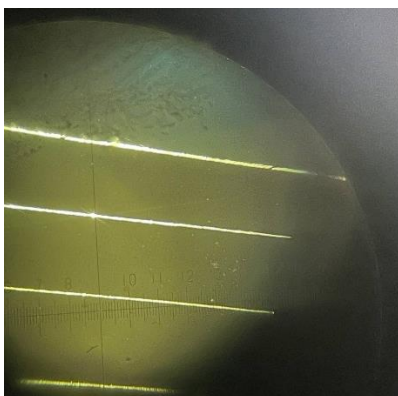
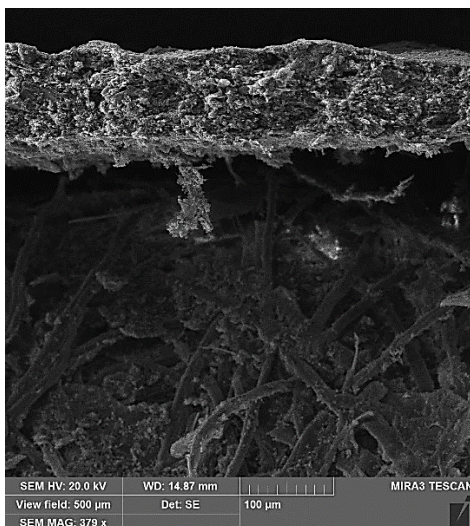
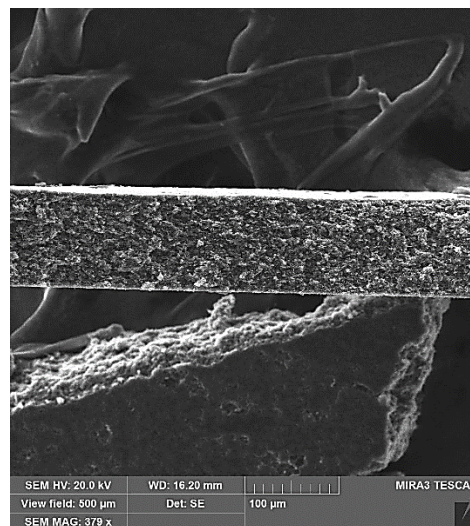


Рисунок 3.23 - Оцінка адгезії покриттів до субстрату метод подряпування.

Для кращого розуміння адгезії ми провели електронну мікроскопію надламаного покриття на ПЕТ та паперовому субстраті рис. 3.24.



а)



б)

Рисунок 3.24 - СЕМ зображення злому КЕП при нанесенні роликівим аплікатором: а) паперовий субстрат; б) ПЕТ субстрат.

З зображень видно, що при зламі на паперовому субстраті частково покриття залишилося на субстраті, а на ПЕТ субстраті покриття рівномірно відшарувалося. Варто зауважити, що на папері покриття мало нерівності, тоді як на ПЕТ субстраті ми отримали дуже рівне покриття товщиною 100 мікрон, що свідчить про інтенсивну інтеграцію КЕП у пористу структуру паперового

субстрата. Паперові субстрати характеризуються високими адгезійними властивостями, однак нанесення покриття на них часто виходить нерівномірним. У випадку використання ПЕТ субстратів, якісна адгезія спостерігається лише при тонких шарах покриття, але при цьому ми отримуємо дуже рівномірне і гладке покриття.

На основі проведених випробувань методом подряпування та методом адгезивної стрічки для 50-мікронного покриття, яке продемонструвало високу адгезію до ПЕТ субстрату, можна стверджувати, що КЕП відзначаються відмінними механічними властивостями і здатністю витримувати значні механічні навантаження без втрати зчеплення з субстратом. Це підтверджує їх придатність для застосувань у сферах, де ключовими є довговічність та надійність покриттів. Таким чином, результати тестувань вказують на високу якість та ефективність розробленої технології покриття, яка відповідає всім необхідним технічним вимогам.

3.3 Дослідження впливу складу композитного покриття на електричні властивості

Дослідження електропровідних властивостей композитних покриттів виконувалось на основі ПВБ, який був обраний за модельний полімер через його універсальність і хімічну стабільність, яка забезпечує ефективну інтеракцію з багатьма типами наповнювачів. В ході експериментів аналізувалися покриття з різними вуглецевими наповнювачами, такими як графіт, сажа та їх гібридні комбінації, для оцінки їх впливу на провідні характеристики кінцевого матеріалу.

Ключовими параметрами дослідження стали питомі показники опору і технологічність фарб, що включала в себе відтворюваність методів нанесення покриттів, однорідність розподілу наповнювачів у полімерній матриці, та здатність створювати покриття з необхідними електричними властивостями.

Окрім вибору оптимальних рецептур наповнювачів, важливою частиною роботи стало вдосконалення методів нанесення покриттів для досягнення максимальної ефективності та якості кінцевих продуктів.

Після перегляду наявної науково-дослідної літератури, ми відібрали різноманітні склади для тестування. З огляду на різні вимоги до фізичних властивостей покриттів та їхньої поведінки при експлуатації, було визначено критерії, за якими відбувався вибір композицій. Основними параметрами стали електропровідність та технологічність застосування розчину (фарби), які необхідно було оптимізувати для забезпечення найкращих експлуатаційних характеристик. Враховуючи це, було вибрано склади з різним вмістом графіту, сажі, щоб оцінити їх вплив на електропровідність, адгезію до різних субстратів, а також зручність нанесення на поверхню.

3.3.1 Дослідження залежності питомого поверхневого опору від концентрації наповнювача

У ході нашого дослідження було здійснено вивчення залежності питомого поверхневого опору від концентрації наповнювача застосовуючи моно-компонент у матриці ПВБ. Перколяційні властивості було дослідження шляхом створення КЕП. Було використано ПВБ у якості матриці і досліджували електричні властивості композитних покриттів з різними наповнювачами та їх концентраціями.

У дослідженні ми використовували модельну систему для створення зразків, аби вивчати залежність питомого поверхневого опору від концентрації наповнювача. Початковим кроком було виготовлення пасти електропровідного наповнювача з використанням тривалкового млина, де матеріал піддавався п'яти проходом для забезпечення ефективного розмелення та однорідності. Ця процедура гарантувала кращу сумісність електропровідного наповнювача з матрицею. Паралельно з цим, на дисольвері було підготовлено розчин ПВБ.

Після того, як паста електропровідного наповнювача та розчин ПВБ були готові, вони змішувалися на дисольвері для формування кінцевого електропровідного розчину. Використання цієї методики забезпечувало однорідність та високу якість кінцевого продукту.

Для створення покриттів з різною товщиною ми застосовували рапельний метод. Цей метод дозволяв нанести покриття з початковою товщиною 50, 75 та 100 мікрон, які після процесу сушіння мали фактичну товщину 25, 30 та 35 мікрон відповідно. Концентрація сухого залишку у фарбі становила 25%. Зразки були нанесені на ПЕТ-плівку. Цю модельну систему виготовлення зразків ми застосовували у всіх наших експериментах для вивчення залежності питомого поверхневого опору від концентрації.

На першому етапі нашого дослідження, основна увага була зосереджена на вивченні електропровідних властивостей графіту марки С1. Ми детально аналізували, як питомий поверхневий опір КЕП з вмістом графіту змінюється в залежності від його концентрації.

Цей підхід дозволив нам вивчати вплив концентрації графіту на електричні властивості кінцевого продукту. Ми зосередились на дослідженні оптимальних пропорцій графіту до ПВБ для досягнення максимальної електропровідності, а також на визначенні межі, за якої збільшення концентрації електропровідного наповнювача не призводить до додаткового покращення електропровідних характеристик. Результати цього етапу дослідження мають ключове значення для розробки ефективних електропровідних композитних покриттів з потрібними електропровідними властивостями. Данні наведені на рис. 3.25.

При 80% вмісту графіту в композиції, чітка залежність питомого поверхневого опору спостерігається для покриттів товщиною 25 та 30 мікрон. Тоді як для покриттів товщиною 35 мікрон, ця залежність стає помітною при 60% вмісті графіту. Збільшення концентрації графіту не призводило до подальшого зниження питомого поверхневого опору. Це може бути

інтерпретовано як досягнення перколяційного порогу, коли утворюється неперервний провідний шлях через наповнювач у матриці.

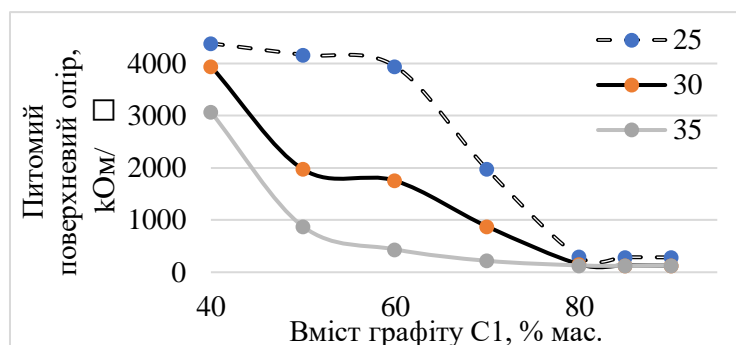


Рисунок 3.25 - Залежність питомого поверхневого опору від вмісту, графіту C1, для різних товщин покриття.

Під час досліджень електропровідних композитних покриттів з використанням наповнювача, що містить від 30% до 80% графіту марки C1, були отримані зразки з напівпрозорою сітчастою структурою. Ці зразки не тільки вирізнялися своєю прозорістю, але й мали відмінну адгезію.

З цих досліджень можна зробити висновок, що товщина покриття суттєво впливає на досягнення перколяційного ефекту, вказуючи на важливість цього параметра у формуванні електропровідних властивостей електропровідних композитних покриттів

На наступному етапі нашого дослідження, ми зосередили увагу на вивченні електропровідних властивостей графіту марки C0. Метою було дослідити, як питомий поверхневий опір залежить від концентрації графіту в електропровідному композитному покритті

Ми провели серію експериментів з різними концентраціями графіту марки C0 у ПВБ, аналізуючи вплив цих змін на електропровідність. Особливу увагу ми звернули на визначення оптимальної концентрації графіту, при якій електропровідність досягає свого максимуму.

Визначення взаємозв'язку між концентрацією графіту та питомим поверхневим опором допомогло нам глибше зрозуміти матеріальні властивості

та налаштувати процеси дослідження для досягнення бажаних характеристик електропровідності. Данні наведені на рис. 3.26.

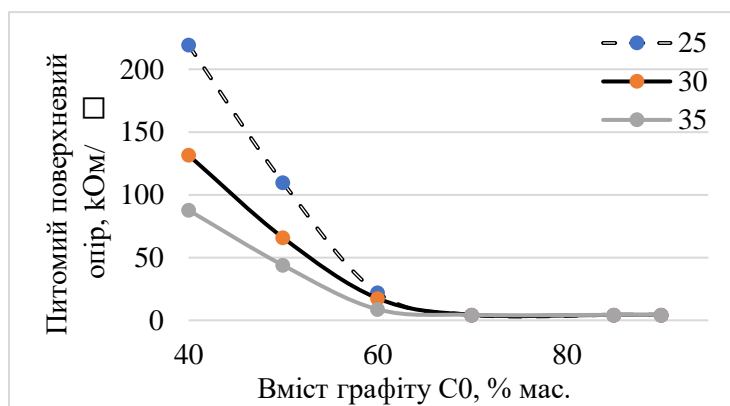


Рисунок 3.26 - Залежність питомого поверхневого опору від вмісту, графіту C0, для різних товщин покриття.

В процесі нашого дослідження ми виявили, графіт марки C0 існує залежність питомого поверхневого опору від концентрації наповнювача. Зокрема, при 70% вмісту графіту спостерігається чітка залежність питомого поверхневого опору від концентрації наповнювача для покриттів товщиною 25 та 30 мікрон. У той же час, для покриттів товщиною 35 мікрон подібна залежність стає помітною при 60% вмісті графіту C0. Варто зазначити, що подальше збільшення концентрації графіту не призводило до зниження питомого поверхневого опору, що можна інтерпретувати як досягнення перколяційного порогу. Це означає, що у матриці формується безперервний провідний шлях через наповнювач.

Важливо також відзначити, що отримані зразки мали напівпрозору сітчасту структуру при підсвічуванні і демонстрували високоякісний розподіл графітового наповнювача в ПВБ матриці, з відмінною адгезією до субстрату. Порівнюючи зразки з графітом марки C1, ми встановили, що нова композиція з графітом C0 має значно кращі показники питомого поверхневого опору, що підкреслює ефективність цього матеріалу в дослідженні.

У наступній фазі нашого дослідження, ми приділили особливу увагу вивченню властивостей сажі ВР2000 як ефективного електропровідного компонента в композитних покриттях.

Ми розробили серію експериментів, в яких систематично варіювали концентрацію сажі ВР2000, щоб визначити оптимальні пропорції для досягнення найвищої електропровідності.

Ця частина дослідження дала нам можливість краще зрозуміти потенціал сажі ВР2000 як високоефективного електропровідного наповнювача, який може значно підвищити електропровідність композитних покриттів. Данні наведені на рис. 3.27.

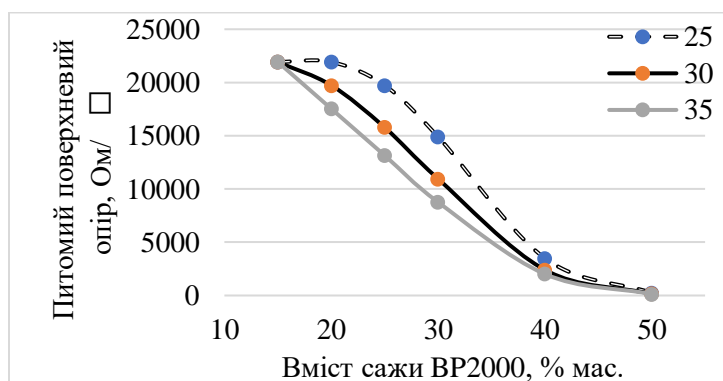


Рисунок 3.27 - Залежність питомого поверхневого опору від вмісту, сажі ВР2000, для різних товщин покриття.

В процесі дослідження електропровідних властивостей сажі марки ВР2000 ми виявили чітку залежність питомого поверхневого опору від її концентрації у композиті. Зокрема, при 50% вмісту сажі для покриттів товщиною 25 мікрон та 40% вмісту сажі для покриттів товщиною 30-35 мікрон спостерігається значне зменшення питомого поверхневого опору. Ці спостереження вказують на досягнення перколяційного порогу, де формується безперервний провідний шлях через наповнювач у КЕП.

Однак, отримані покриття з сажею ВР2000 демонструють цікаві характеристики, зокрема напівпрозору сітчасту структуру та угруповання частинок сажі. Це може свідчити про внутрішні напруги в частинках, що

призводять до реагломерації. Такий процес збільшує відстань для "перестрибування" електричного струму між частками, негативно впливаючи на електропровідність.

Для вирішення цієї проблеми та поліпшення електропровідних властивостей композиту, можливо застосувати змінені методи подрібнення або додаткові етапи обробки, щоб уникнути або зменшити реагломерацію. Також ефективними можуть бути поверхнево-активні речовини або інші добавки, які сприяють кращому диспергуванню сажі в полімерній матриці.

У наступній фазі нашого дослідження, ми вирішили зосередитися на властивостях сажі ХС72 як потенційного електропровідного компонента для використання в електропровідних композитних покриттях. Метою цієї частини дослідження було визначити, як різні рівні концентрації сажі ХС72 впливають на питомий поверхневий опір.

Результати цієї частини дослідження допоможуть нам у розробці нових видів композитних матеріалів з високим рівнем електропровідності. Данні наведені на рис. 3.28.

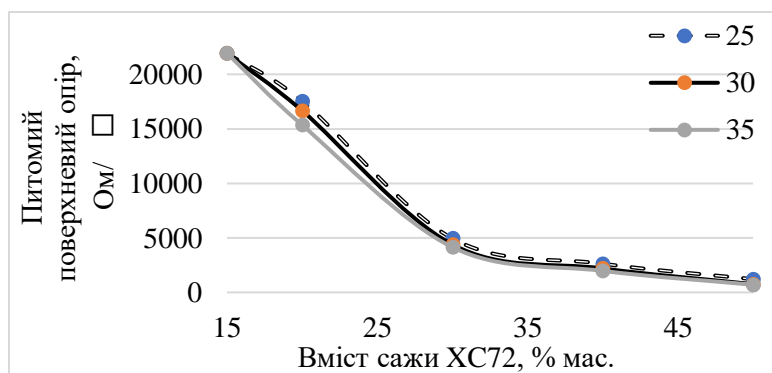


Рисунок 3.28 - Залежність питомого поверхневого опору від вмісту, сажі ХС72, для різних товщин покриття.

В процесі наших досліджень ми виявили, що для сажі марки ХС72 існує виразна залежність питомого поверхневого опору від її концентрації. Зокрема, при 40% вмісту ХС72 у композиті для електропровідних композитних покриттів товщиною 25 та 30 мікрон спостерігається значне зниження

питомого поверхневого опору. Тоді як для електропровідних композитних покриттів товщиною 35 мікрон оптимальна концентрація ХС72 становить 35%. Подальше збільшення концентрації сажі не призводило до подальшого зниження питомого поверхневого опору, що можна інтерпретувати як досягнення перколяційного порогу, де утворюється безперервний провідний шлях у композитній матриці.

Однак, отримані з сажі ХС72 покриття мали напівпрозору сітчасту структуру з видимим угрупованням частинок сажі, що може свідчити про внутрішні напруги всередині частинок. Ці напруги, ймовірно, призводять до стягування частинок, утворюючи агломерати. Такий процес реагломерації, можливо, виникає через високий рівень взаємодії між частинками, що об'єднуються в більші структури під час висихання покриття.

Ця реагломерація може бути причиною високого електричного опору покриттів. Великі агломерати зменшують кількість точок контакту між частками, що є важливим для обмеження електричної провідності. Агломерація також спричиняє неоднорідність розподілу частинок сажі в покритті, що негативно впливає на електропровідні властивості.

Для поліпшення електричної провідності можливо застосувати зміну технології подрібнення, ввести додаткові етапи обробки для зменшення реагломерації, або використати поверхнево-активні речовини чи інші добавки для покращення дисперсії частинок сажі в полімерній матриці.

У наступному етапі нашого дослідження ми вирішили зосередити увагу на аналізі впливу вуглецевого волокна ВВ як активного компонента в КЕП. Це дослідження було спрямоване на вивчення того, як концентрація вуглецевих волокон в КЕП може вплинути на їх електропровідні властивості.

Особлива увага була приділена взаємодії між волокнами та матрицею, а також можливостям створення перколяційних мереж, які є вирішальними для формування провідних шляхів у КЕП. Данні наведені на рис. 3.29.

При вмісті 70% вуглецевого волокна для покриттів товщиною 25 мікрон спостерігається істотне зниження питомого поверхневого опору. Для КЕП товщиною 30-35 мікрон, оптимальна концентрація вуглецевого волокна становить 50%, де також помітне значне зниження питомого поверхневого опору. Подальше збільшення концентрації вуглецевого волокна призводить до поступового зниження показників питомого поверхневого опору, що можна інтерпретувати як досягнення перколяційного порогу, коли утворюється неперервний провідний шлях через наповнювач у матриці.

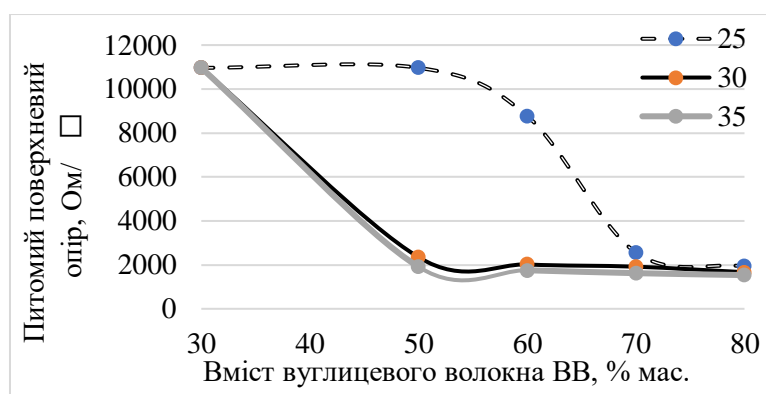


Рисунок 3.29 - Залежність питомого поверхневого опору від вмісту вуглецевого волокна, для різних товщин покриття.

У процесі досліджень ми розробили КЕП з вуглецевим волокном, яке вирізнялося оптичними та адгезійними властивостями. Покриття мало напівпрозору сітчасту структуру. Варто зазначити, що адгезія композитів до основи була задовільною, а розподіл часток вуглецевого волокна (ВВ) був рівномірним. Ця рівномірність розподілу є ключовою для забезпечення бажаної електропровідності та механічної міцності композитного покриття.

У рамках нашого дослідження, особлива увага була приділена аналізу властивостей КЕП, що було створене з використанням вуглецевих нанотрубок CNT100. Ми зосередились на вивченні ефективності цих нанотрубок як наповнювача в електропровідних композитних покриттях та їх впливу на питомий поверхневий опір. Основним аспектом дослідження було

встановлення зв'язку між концентрацією CNT100 та КЕП. Ми досліджували, як зміна вмісту нанотрубок в покритті впливає на його електричні властивості, зокрема питомий поверхневий опір. Данні наведені на рис. 3.30.

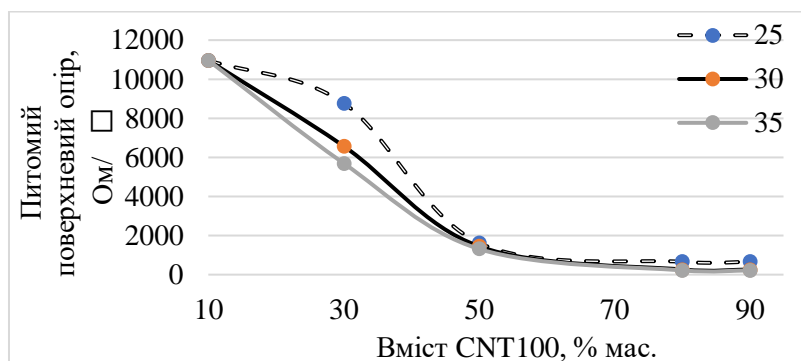


Рисунок 3.30 - Залежність питомого поверхневого опору від наповнювача, нанотрубок CNT100, для різних товщин покриття.

Для нанотрубок марки CNT100 спостерігається чітка залежність питомого поверхневого опору від концентрації наповнювача, при 50% вмісту CNT100 для товщини нанесення 25, 30 та 35 мікрон. Подальше збільшення концентрації виявило подальше не суттєве зменшення показників питомого поверхневого опору. Цей ефект можна інтерпретувати як результат досягнення перколяційного порогу, де створюється безперервний провідний шлях через наповнювач у полімерній матриці.

Дослідження показали, що КЕП, створені з використанням CNT100, мали деяку ступінь напівпрозорої сітчастої структури. Такий ефект може бути пов'язаний з частковим подрібненням нанотрубок під час процесу диспергування. Це може вказувати на недостатньо високу енергію подрібнення доступними методами диспергування, що призводить до нерівномірного розподілу нанотрубок у полімерній матриці.

Така неповна інтеграція CNT100 у електропровідне композитне покриття безпосередньо впливає на електропровідні властивості КЕП, збільшуючи електричний опір. Поясненням цього є те, що для формування ефективного провідного шляху необхідний високий ступінь контакту між

окремими частинками наповнювача, який, в даному випадку, не був досягнутий через нерівномірність розподілу.

У рамках нашого дослідження ми зосередили увагу на вивченні властивостей КЕП, утвореного з використанням вуглецевих нанотрубок CNT7000. Основною метою цього етапу було дослідити потенціал CNT7000 як ефективного наповнювача для покращення електропровідності КЕП. Особливий акцент було зроблено на визначенні оптимальної концентрації та розподілу нанотрубок у полімерній матриці, аби максимізувати електропровідні властивості покриттів. Данні наведені на рис. 3.31.

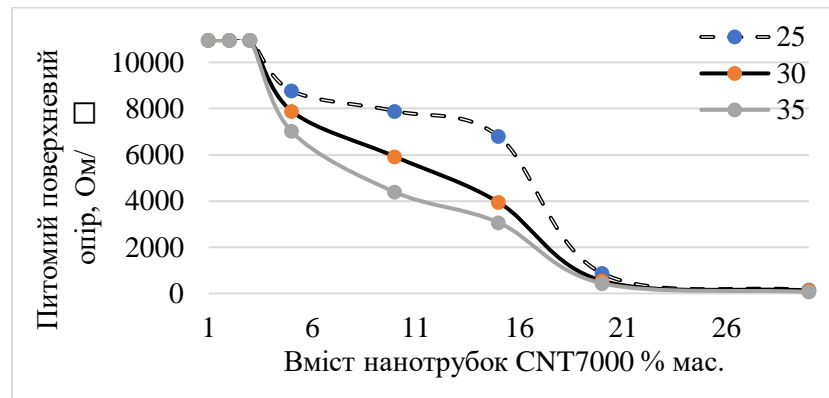


Рисунок 3.31 - Залежність питомого поверхневого опору від вмісту нанотрубок CNT7000, для різних товщин покриття.

У ході наших досліджень з нанотрубками марки CNT7000 ми встановили, що питомий поверхневий опір КЕП має чітку залежність від концентрації нанотрубок. При 20% вмісті CNT7000 для покриттів товщиною 25, 30 та 35 мікрон спостерігається зниження питомого поверхневого опору. Подальше збільшення концентрації виявило подальше не суттєве поступове зменшення показників питомого поверхневого опору. Що вказує на досягнення перколяційного порогу і формування безперервного провідного шляху через наповнювач у матриці.

Дослідження також виявили, що КЕП, створені з використанням CNT7000, мали напівпрозору сітчасту структуру. Цей ефект можна інтерпретувати як ознаку часткового подрібнення часток нанотрубок під час їх диспергування. Це може бути пов'язано з недостатньою енергією подрібнення доступними методами диспергування, що призводить до нерівномірного розподілу нанотрубок у полімерній матриці.

Неповна інтеграція CNT7000 у композитну матрицю призводить до збільшення електричного опору. Ефективний електропровідний шлях вимагає тісного контакту між окремими частинками наповнювача, що в даному випадку не було повністю досягнуто.

3.3.2 Дослідження електричних властивостей композитних покриттів

КЕП, що включають кілька типів наповнювачів, відрізняються від традиційних покриттів, які базуються лише на одному наповнювачі, такому як сажа або графіт. Ця конфігурація дозволяє значно покращити електропровідні характеристики та інші функціональні властивості покриттів. На відміну від мононаповнених систем, композитні системи об'єднують два або більше різних типів наповнювачів, що дозволяє їм використовувати переваги кожного компонента. Це призводить до синергетичного ефекту, де комбіновані наповнювачі створюють більш ефективні провідні мережі, що підвищує загальну електропровідність КЕП. Окрім цього, композитні покриття можуть мати покращені механічні властивості, такі як міцність і гнучкість, завдяки взаємодії між різними наповнювачами. Така комбінація дозволяє створювати покриття, які збалансовані між механічними характеристиками та електропровідністю. Також, КЕП можуть виявитися більш економічними, оскільки вони дозволяють використовувати меншу кількість дорогих матеріалів. Однак, головним чинником, який впливає на ефективність таких

покриттів, залишається якість розподілу наповнювачів в полімерній матриці та взаємодія між різними наповнювачами.

Для створення КЕП велика увага була приділена визначенню перколяційного порогу для кожного компонента наповнювача окремо. Цей етап був критично важливим, оскільки він дозволяв більш точно розуміти, як кожен з компонентів наповнювача може вплинути на загальні властивості КЕП. Серед розгляданих компонентів гібридного наповнювача були два типи сажі - ХС72, ВР2000 та 330, графіт марки С0, С1 а також нанотрубки - CNT7000, CNT100. Загальний вміст наповнювача для всіх КЕП складав 70%. Варіювали співвідношення складових композитного наповнювача в діапазоні 10%-20% для першого компонента і відповідно 60%-50% для другого компонента. Вміст кожного компонента композитного наповнювача змінювався з кроком у 5%. А вміст полімеру у всіх композитах складав 30%.

Отримані дані стали фундаментом для проектування КЕП, що використовують оптимізоване співвідношення цих компонентів табл. 3.10.

Таблиця 3.10

Склад композитних електропровідних покриттів

№ композиції	Вміст компонентів, % мас.				
	Полімерна матриця ПВБ	Графіт	Сажа ВР 2000	Сажа ХС 72	Сажа N330
1	30	60	-	-	10
2	30	55	-	-	15
3	30	50	-	-	20
4	30	60	10	-	-
5	30	55	15	-	-
6	30	50	20	-	-
7	30	60	-	10	-
8	30	55	-	15	-
9	30	50	-	20	-

У цьому дослідженні проводиться перебір різних композицій з метою виявлення найкращих варіантів для КЕП. Головну роль у цьому процесі

відіграє постійний вміст ПВБ як полімерної матриці (30%) та варіації вмісту графіту та різних типів сажі, що включають ВР 2000, ХС 72 і N330. Ключовим аспектом є визначення співвідношення між цими наповнювачами для досягнення найкращих електропровідних властивостей.

Графіт використовується у трьох різних концентраціях (60%, 55%, 50%), а сажа представлена трьома різними типами у різних відсоткових співвідношеннях, що дозволяє детально оцінити вплив кожного компоненту та їх комбінацій на електропровідні характеристики покриттів. Такий підхід допомагає дослідникам зрозуміти, як зміна співвідношення між графітом та різними типами сажі може вплинути на функціональні характеристики покриття, включаючи електропровідність та стабільність.

Основна мета дослідження полягає у визначенні композицій, які забезпечують найкращі властивості для певних застосувань, з особливим фокусом на гомогенність та вміст електропровідного наповнювача. Результати цього дослідження не тільки дозволять глибше зрозуміти роль окремих електропровідних наповнювачів у формуванні властивостей КЕП, але й сприятимуть розробці оптимізованих рецептур для різних застосувань.

В рамках досліджень було зосереджено увагу на композиціях, створених на основі графіту С0 та сажі 330 з різним співвідношенням, з акцентом на їх властивості. Особлива увага була приділена вивченню цих композицій з різними товщинами, нанесеними на паперовий субстрат. Для нанесення композицій використовували роликковий аплікатор з анілоксовим валом табл. 3.11.

Дослідження композиції №1, що включає 30% ПВБ, 60% графіту С0 та 10% сажі 330, виявило значні переваги у показниках електропровідності порівняно з композитними покриттями, що містять лише один вид наповнювача. Ця композиція демонструє, що поєднання різних наповнювачів може значно підвищити ефективність покриття.

Рецептурний склад та властивості композиції №1

Склад	Вміст компоненту мас. %		
ПВБ	30		
Графіт С0	60		
Сажа 330	10		
Властивості	Товщина, мкм		
	40	60	130
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	331,00	255,00	95,60
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	1,32	1,53	1,24

При товщині покриття 40 мікрон питомий поверхневий опір склав 331,00 Ом, знизився до 255,00 Ом при товщині 60 мікрон і до 95,60 Ом при товщині 130 мікрон. Таке зниження опору зі збільшенням товщини свідчить про покращення електропровідності.

Аналогічно, питомий об'ємний опір показав значне зниження: з 1,32 Ом*см при 40 мікронах до 1,24 Ом*см при 130 мікронах. Ці результати підтверджують, що використання гібридної композиції в порівнянні з мононаповненими покриттями значно покращує електропровідні властивості.

Наступне співвідношення КЕП на основі графіту С0 і сажі 330 з різними товщинами, нанесеними на паперовий субстрат. Для нанесення композицій використовували роликівий аплікатор з анілоксовим валом табл. 3.12.

Дослідження наступної композиції №2, в якій використовується ПВБ у концентрації 30%, графіт С0 на рівні 55% та сажа 330 - 15%, виявило цікаві показники електричного опору. За даними вимірювань, при товщині покриття 40 мікрон питомий поверхневий опір становив 219,00 Ом, який зменшувався до 120,90 Ом при товщині 60 мікрон, і досягав 52,50 Ом при товщині 130 мікрон. Ці результати свідчать про зниження опору зі збільшенням товщини покриття, що є характерною тенденцією для таких електропровідних композитних покриттів.

Рецептурний склад та властивості композиції №2

Склад	Вміст компоненту мас. %		
ПВБ	30		
Графіт С0	55		
Сажа 330	15		
Властивості	Товщина, мкм		
	40	60	130
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	219,00	120,90	52,50
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,88	0,73	0,68

Водночас, питомий об'ємний опір також зменшувався зі збільшенням товщини покриття: від 0,88 Ом*см при товщині 40 мікрон до 0,68 Ом*см при товщині 130 мікрон. Це підкреслює, що збільшення частки сажі (15%) в композиції може сприяти зменшенню питомого об'ємного опору та питомого поверхневого опору.

Результати цього дослідження підтверджують, що зміна співвідношень компонентів у композиції впливає на її електропровідні властивості, відкриваючи можливості для подальшої оптимізації та покращення характеристик електропровідних композитних матеріалів.

Наступне співвідношення КЕП на основі графіту С0 і сажі 330 з різними товщинами, нанесеними на паперовий субстрат. Для нанесення композицій використовували роликівий аплікатор з анілоксовим валом табл. 3.13.

У наступному дослідженні було вивчено композицію №3, що містила ПВБ у концентрації 30%, графіт С0 на рівні 50% та сажу 330 у пропорції 20%. Ця формула продемонструвала унікальні електропровідні властивості, залежні від товщини покриття.

Вимірювання показали, що питомий поверхневий опір цієї композиції становить 107,40 Ом при товщині 40 мікрон, знижується до 54,40 Ом при 60 мікронах, та досягає 29,30 Ом при товщині 130 мікрон. Такі показники

свідчать про значне зменшення поверхневого опору зі збільшенням товщини покриття, що є типовою характеристикою для подібних матеріалів.

Таблиця 3.13

Рецептурний склад та властивості композиції №3

Склад	Вміст компоненту мас. %		
ПВБ	30		
Графіт С0	50		
Сажа 330	20		
Властивості	Товщина, мкм		
	40	60	130
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	107,40	54,40	29,30
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,43	0,33	0,38

Крім того, питомий об'ємний опір також змінювався в залежності від товщини, показуючи значення 0,43 Ом*см при 40 мікронах, зниження до 0,33 Ом*см при 60 мікронах, але з легким зростанням до 0,38 Ом*см при 130 мікронах. Цікаво, що зі збільшенням вмісту сажі в композиції спостерігалось зниження поверхневого опору, але зміна об'ємного опору не була такою однозначною.

Наступним етапом дослідження були співвідношення сажі ВР2000 з графітом С0, з акцентом на їх електропровідні властивості. Особлива увага була приділена вивченню цих композицій з різними товщинами, нанесеними на плівковий ПЕТ субстрат. Для нанесення композицій використовували ракельний аплікатор з товщинами 50, 75 і 100 мікрон табл. 3.14.

У цьому експерименті була досліджена нова композиція №4, яка складалася з 30% ПВБ, 60% графіту С0, та 10% сажі ВР2000. Ця композиція показала дуже високі значення питомого поверхневого опору, які значно змінювались в залежності від товщини покриття.

Питомий об'ємний опір також виявився високим, складаючи 2026,3 Ом*см при 25 мікронах, знижуючись до 1,90 Ом*см при 30 мікронах, та знову

знижуючись до 1,24 Ом*см при 35 мікронах. Ця тенденція зменшення об'ємного опору зі збільшенням товщини покриття є загальною для КЕП.

Таблиця 3.14

Рецептурний склад та властивості композиції №4

Склад	Вміст компоненту мас. %		
ПВБ	30		
Графіт С0	60		
Сажа ВР2000	10		
Властивості	Товщина, мкм		
	25	30	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	810522,80	634,21	353,95
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	2026,31	1,90	1,24

Наступне співвідношення сажі ВР2000 з графітом С0, з акцентом на їх електропровідні властивості. Особлива увага була приділена вивченню цих композицій з різними товщинами, нанесеними на плівковий ПЕТ субстрат. Для нанесення композицій використовували ракельний аплікатор з товщинами 50, 75 і 100 мікрон табл. 3.15.

Таблиця 3.15

Рецептурний склад та властивості композиції №5

Склад	Вміст компоненту мас. %		
ПВБ	30		
Графіт С0	55		
Сажа ВР2000	15		
Властивості	Товщина, мкм		
	25	30	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	1662,27	1280,70	970,61
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	4,16	3,84	3,40

У цьому експерименті було досліджено композицію №5, що складалася з 30% ПВБ, 55% графіту С0 та 15% сажі ВР2000. Результати показали цікаві властивості щодо електропровідності при різних товщинах покриття.

При товщині покриття всього 25 мікрон, питомий поверхневий опір складав 1662,27 Ом, зменшуючись до 1280,70 Ом при товщині 30 мікрон і досягаючи 970,61 Ом при товщині 35 мікрон. Це свідчить про поганий рівень диспергування сажі ВР2000.

Питомий об'ємний опір також зменшувався зі збільшенням товщини покриття: він складав 4,16 Ом*см при 25 мікронах, знижувався до 3,84 Ом*см при 30 мікронах і досягав 3,40 Ом*см при 35 мікронах. Ці дані підтверджують, що вуглецеві наповнювачі значно впливають на електропровідні властивості композиту, особливо при зміні їхньої концентрації.

Останнє співвідношення сажі ВР2000 з графітом С0, з акцентом на їх електропровідні властивості. Особлива увага була приділена вивченню цих композицій з різними товщинами, нанесеними на плівковий ПЕТ субстрат. Для нанесення композицій використовували ракельний аплікатор з товщинами 50, 75 і 100 мікрон табл. 3.16.

Таблиця 3.16

Рецептурний склад та властивості композиції №6

Склад	Вміст компоненту мас. %		
ПВБ	30		
Графіт С0	50		
Сажа ВР2000	20		
Властивості	Товщина, мкм		
	25	30	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	1802,62	1456,13	941,22
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	4,51	4,37	3,29

Композиція №6, що містить 30% ПВБ, 50% графіту С0 та 20% сажі ВР2000, показала вражаючі результати у термінах її електропровідних характеристик. При вимірюванні питомого поверхневого опору, значення склали 1802,62 Ом для товщини 25 мікрон, 1456,13 Ом для 30 мікрон, та 941,22 Ом для 35 мікрон. Це свідчить про певний рівень електропровідності матеріалу, який знижується зі збільшенням товщини покриття.

Значення питомого об'ємного опору також демонструють цікаву динаміку: 4,51 Ом*см для 25 мікрон, 4,37 Ом*см для 30 мікрон та 3,29 Ом*см для 35 мікрон. Ці результати підтверджують, що ця композиція є ефективною з точки зору електропровідності, особливо при більш товстих покриттях.

Також додаємо данні гібридного електропровідного композитного покриття на основі графіту С0 і сажі ВР2000 з різними товщинами, нанесеними на паперовий субстрат. Для нанесення композицій використовували роликівий аплікатор з анілоксовим валом для порівняння з ракульним аплікатором табл. 3.17.

Таблиця 3.17

Рецептурний склад та властивості композиції №6

Склад	Вміст компоненту мас. %		
ПВБ	30		
Графіт С0	50		
Сажа ВР2000	20		
Властивості	Товщина, мкм		
	40	60	70
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	55,28	42,03	39,87
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,22	0,25	0,28

Ця композиція, склад якої включає 30% ПВБ, 50% графіту С0, та 20% сажі ВР2000, була нанесена за допомогою аплікатора з анілоксовим валом, що призвело до значних змін у її електропровідних характеристиках порівняно з нанесенням ракульним аплікатором.

При товщині покриття 40 мікрон питомий поверхневий опір склав 55,28 Ом, що є значно меншим, ніж з ракульним аплікатором. Подібне спостерігається і для товщин 65 мікрон 42,03 Ом та 70 мікрон 39,87 Ом.

Щодо питомого об'ємного опору, він також зменшився у порівнянні з ракульним методом, досягаючи 0,22 Ом*см для 40 мікрон, 0,25 Ом*см для 65 мікрон, та 0,28 Ом*см для 70 мікрон. Це свідчить про те, що використання роликівого аплікатора з анілоксовим валом сприяє кращій електропровідності

матеріалу. Варто відмітити, що такий тип нанесення забезпечує більш рівномірний та точний розподіл матеріалу, що може бути ключовим фактором у зменшенні електричного опору.

При проведенні порівняльного аналізу електропровідних властивостей сажі ВР2000 і сажі 330, особливо звертали увагу на питомий поверхневий опір при однаковій товщині шару в 60 мікрон. Виявилось, що питомий поверхневий опір сажі ВР2000 був на 12 Ом нижчий, ніж у сажі 330. Це значно вказує на кращі електропровідні властивості сажі ВР2000 у порівнянні зі сажею 330.

Наступним етапом дослідження були співвідношення сажі ХС72 з графітом С0, з акцентом на їх електропровідні властивості. Особлива увага була приділена вивченню цих композицій з різними товщинами, нанесеними на плівковий ПЕТ субстрат. Для нанесення композицій використовували ракельний аплікатор з товщинами 50, 75 і 100 мікрон табл. 3.18.

Таблиця 3.18

Рецептурний склад та властивості композиції №7

Склад	Вміст компоненту мас. %		
ПВБ	30		
Графіт С0	60		
Сажа ХС72	10		
Властивості	Товщина, мкм		
	25	30	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	1442,98	1162,28	716,23
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	3,61	3,49	2,5

Композиція №7, у якій використано 30% ПВБ, 60% графіту С0 та 10% сажі ХС72, показала цікаві результати щодо своїх електропровідних властивостей. Спостерігається зниження питомого поверхневого опору зі збільшенням товщини покриття: при 25 мікронах опір становив 1442,98 Ом, при 30 мікронах знизився до 1162,28 Ом, і при 35 мікронах опустився до 716,23 Ом.

Ці дані свідчать про те, що збільшення товщини покриття сприяє кращій електропровідності. Високий вміст графіту С0, який має відмінні електропровідні властивості, в комбінації з невеликою кількістю сажі ХС72, видається ключовим фактором у цьому явищі.

Крім того, питомий об'ємний опір також зменшується зі збільшенням товщини: 3,61 Ом*см для 25 мікрон, 3,49 Ом*см для 30 мікрон і 2,51 Ом*см для 35 мікрон.

У наступному дослідженні основна увага була сконцентрована на вивченні композицій, які включають сажу ХС72 та графіт С0, з фокусом на їхніх електропровідних властивостях. Дослідження було націлене на оцінку впливу різних товщин цих композицій, що наносилися на плівковий ПЕТ як субстрат.

Використання ракельного аплікатора дозволило створити покриття з точно контрольованими товщинами 50, 75 і 100 мікрон. Це ключовий аспект експерименту, адже він дозволяє виміряти вплив товщини покриття на електропровідність матеріалу табл. 3.19.

Таблиця 3.19

Рецептурний склад та властивості композиції №8

Склад	Вміст компоненту мас. %		
ПВБ	30		
Графіт С0	55		
Сажа ХС72	15		
Властивості	Товщина, мкм		
	25	30	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	643,42	477,19	232,89
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	1,61	1,43	0,82

Композиція №8, складена з 30% ПВБ, 55% графіту С0 і 15% сажі ХС72, демонструє цікаву залежність електропровідних властивостей від товщини

покриття. Зміна електропровідності з товщиною, як показують дані, може бути прямо пов'язана з збільшенням частки сажі ХС72 в композиції.

Сажа ХС72, відома своїми високими електропровідними властивостями, при збільшенні її частки у суміші, сприяє формуванню більш ефективних провідних шляхів у матеріалі. Це пояснює зниження питомого поверхневого опору з 643.42 Ом при 25 мікронах до 232.89 Ом при 35 мікронах, а також зменшення питомого об'ємного опору з 1.61 Ом*см при 25 мікронах до 0.82 Ом*см при 35 мікронах.

У ході наступного етапу дослідження основна увага була зосереджена на аналізі взаємодії між сажею ХС72 та графітом С0, з акцентом на вивчення їхніх електропровідних властивостей. Особливий інтерес представляло дослідження ефектів різних товщин цих композицій, які були нанесені на плівкову основу з ПЕТ. Для цього процесу нанесення використовувався спеціальний ракельний аплікатор, що дозволяв створювати покриття з товщиною 50, 75, та 100 мікрон, що давало можливість детально вивчати залежність електропровідних характеристик від товщини покриття табл. 3.20.

Таблиця 3.20

Рецептурний склад та властивості композиції №9

Склад	Вміст компоненту мас. %		
ПВБ	30		
Графіт С0	50		
Сажа ХС72	20		
Властивості	Товщина, мкм		
	25	30	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	299,10	243,86	163,60
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,75	0,73	0,57

Композиція №9, що складається з 30% ПВБ, 50% графіту С0 та 20% сажі ХС72, продемонструвала значні зміни у своїх електропровідних властивостях. Зокрема, при товщині покриття в 25 мікрон, питомий

поверхневий опір складав 299,10 Ом; при 30 мікронах - 243,86 Ом; і при 35 мікронах - 163,60 Ом. Що стосується питомого об'ємного опору, він становив 0,75 Ом*см при 25 мікронах, 0,73 Ом*см при 30 мікронах та 0,57 Ом*см при 35 мікронах. Ці дані чітко свідчать, що збільшення частки сажі ХС72 в композиції позитивно впливає на електропровідні властивості, особливо зі зростанням товщини покриття.

Співставлення електропровідних властивостей сажі ХС72 та сажі ВР2000 у КЕП виявило значні відмінності. Сажа ХС72 продемонструвала значно нижчі значення питомого поверхневого опору, які в деяких випадках були в п'ять разів менші, а інколи навіть більші, у порівнянні з сажею ВР2000. Це вказує на те, що ХС72 має значно кращі електропровідні характеристики для застосувань у КЕП.

Для глибшого порівняння електропровідних властивостей, ми представляємо детальні дані про питомі показники опору сажі ХС72 в порівнянні з іншими марками сажі, включно з тими, що вже були описані. Це порівняння дозволяє нам чітко оцінити, наскільки ефективно сажа ХС72 сприяє електропровідності у порівнянні з альтернативними матеріалами. Нанесеними на паперовий субстрат за допомогою роликкового аплікатора з анілоксовим валом, дозволяє нам оцінити вплив цих компонентів на електропровідні властивості композитного покриття табл. 3.21.

Композиція №7, що складається з 30% ПВБ, 50% графіту С0 і 10% сажі ХС72, показала значні результати щодо питомого поверхневого та об'ємного опорів при різних товщинах покриття. Зокрема, при товщині 60 мікрон питомий поверхневий опір становив 78,41 Ом, при 80 мікрон – 62,52 Ом, а при 100 мікронах – лише 56,5 Ом. Щодо питомого об'ємного опору, він склав 4,70 Ом*см при 60 мікронах, 5,00 Ом*см при 80 мікронах та 0,67 Ом*см при 100 мікронах.

Рецептурний склад та властивості композиції №7

Склад	Вміст компоненту мас. %		
ПВБ	30		
Графіт С0	60		
Сажа ХС72	10		
Властивості	Товщина, мкм		
	60	80	100
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	78,41	62,52	56,5
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	4,70	5,00	0,67

Ці значення є особливо значущими, адже вони демонструють, що використання лише 10% сажі ХС72 може забезпечити кращі показники питомих опорів у порівнянні з композиціями, що містять 20% сажі 330 або сажі ВР2000 при товщині в 60 мікрон. Такий результат свідчить про високу ефективність сажі ХС72 у покращенні електропровідних властивостей КЕП, навіть при її відносно низькій концентрації в композиті.

У дослідженні ми виявили, що збільшення частки сажі ХС72 у композиціях з графітом С0 значно покращує електропровідні властивості. Це було встановлено через вимірювання питомого поверхневого опору у зразках різної товщини. Також було виявлено, що сажа ХС72 показує значно кращі показники порівняно з сажею ВР2000, особливо у більш товстих шарах, що свідчить про її ефективність у КЕП.

Окрім того, ми порівняли ці дані з результатами для сажі 330 і ВР2000, щоб встановити релевантність використання сажі ХС72. Наші вимірювання показали, що при 10% додаванні сажі ХС72 значення питомих опорів були значно кращі, ніж при використанні 20% сажі 330 і сажі ВР2000.

На основі цих даних ми вирішили обрати цей рецептурний склад як модельний для подальшої модифікації з використанням нанотрубок CNT7000. Це дозволило нам порівняти нову композицію зі стандартною, що включала графіт С0 і сажу ХС72, щоб оцінити вплив додавання нанотрубок на

електропровідні властивості. Нанесеними на паперовий субстрат за допомогою роликового аплікатора з анілоксовим валом, дозволяє нам оцінити вплив цих компонентів на електропровідні властивості гібридного покриття з товщиною 100 мікрон табл. 3.22.

Таблиця 3.22

Рецептурні склади досліджуваних полімерних композицій

№ композиції	ПВБ	Графіт С0	Сажі ХС72	Нанотрубки CNT7000	Товщина, мкм	Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см.
10	30	60	9	1	100	41,15	0,41
11	30	60	8	2	100	56,64	0,57
12	30	60	7	3	100	47,55	0,48
13	30	59	10	1	100	53,11	0,53
14	30	58	10	2	100	57,35	0,57
15	30	57	10	3	100	40,93	0,41

У дослідженні було вивчено вплив заміни часток сажі ХС72 і графіту С0 вуглецевими нанотрубками CNT7000 на питомі опори в електропровідних композитах із товщиною зразків 100 мікрон.

При заміні 1% сажі ХС72 на нанотрубки CNT7000, питомий поверхневий опір становив 41,15 Ом, а питомий об'ємний опір – 0,41 Ом*см. При 2% заміні відповідні показники були 56,64 Ом і 0,57 Ом*см; при 3% заміні – 57,55 Ом і 0,58 Ом*см.

У випадку заміни графіту С0 на нанотрубки CNT7000 результати були такі: при 1% заміні питомий поверхневий опір склав 53,11 Ом, а питомий об'ємний опір – 0,53 Ом*см. При 2% заміні ці показники були 57,35 Ом і 0,57 Ом*см відповідно; при 3% заміні – 40,93 Ом і 0,41 Ом*см.

Для складу композиту, що містив 10% сажі ХС72, 60% графіту С0, та 30% ПВБ, питомий поверхневий опір становив 38,98 Ом, а питомий об'ємний

опір – 0,39 Ом*см. Це вказує, що додавання CNT7000 погіршило електричні властивості композиту порівняно з модельною рецептурою.

Ці зміни у показниках питомих опорів можуть бути зумовлені кількома факторами, зокрема недостатнім диспергуванням нанотрубок доступними методами, що може призводити до формування кластерів і варіацій у провідності. Також поверхневий натяг і угруповання часток сажі можуть впливати на розподіл нанотрубок у матриці, формуючи неефективні провідні мережі.

На основі проведеного дослідження ми дійшли висновку, що рецептура композиту, що складається з 30% ПВБ, 10%-20% сажі XC72 і 50%-60% графіту C0, демонструє найкращі показники питомого поверхневого та питомого об'ємного опору. Ці результати вказують на те, що подальше підвищення вмісту сажі XC72 замість графіту C0 може сприяти покращенню електропровідних властивостей композиту. У зв'язку з цим, комбінація графіту C0 та сажі XC72 в таких пропорціях є ефективною рецептурою для створення КЕП.

3.3.3 Дослідження впливу полімерного зв'язуючого на властивості композитних електропровідних покриттів

Сучасні технологічні досягнення та інновації у галузі матеріалознавства інтенсивно розвиваються через потребу в розробці гнучких, ефективних та довговічних матеріалів, особливо у сфері електропровідних композитів. Важливою областю дослідження є вибір оптимальних полімерних матриць, які використовуються для електропровідних покриттів, здатних відповідати сучасним вимогам та застосуванням. Це дослідження зосереджено на аналізі різних типів полімерних матриць, таких як ПВБ, ПУ, НЦ, та БС, для визначення їх придатності у розробці КЕП [256].

Кожен з цих полімерних зв'язуючих володіє унікальними властивостями, що робить їх потенційно придатними для певних застосувань. Наприклад, ПВБ

відомий своєю гнучкістю, що є критично важливо для багатьох електронних застосувань. ПУ пропонує відмінну еластичність, що є важливим для розтяжних та гнучких компонентів. НЦ, з іонними властивостями, ідеально підходить для застосування в електронних пристроях, тоді як БС, зі своєю високою термічною стійкістю, є відмінним вибором для високотемпературних застосувань. Дослідження цих матеріалів дозволяє розкрити нові можливості в розробці електропровідних композитів, які можуть знайти застосування у різноманітних галузях промисловості.

Вміст електропровідного наповнювача 10% сажі XC72 вміст графіту складає 60% для всіх композицій. Полімерна матриця складала 30%.

У ході досліджень значну увагу було приділено полімерній матриці ПВБ. Одним з ключових аспектів цього дослідження було вивчення ПВБ, нанесеного на паперовий субстрат за допомогою роликівого аплікатора з анілоксовим валом товщиною 100 мікрон табл. 3.23.

Таблиця 3.23

Рецептурний склад та властивості композиції №1

Склад	Вміст компоненту мас. %
ПВБ	30
Графіт С0	60
Сажа XC72	10
Властивості	Значення
Товщина, мкм	100
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	36,50
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,37

Питомий поверхневий опір в 36,50 Ом вказує на якісну електропровідність покриття на його поверхні, що є значущим параметром для застосувань, де важливою є поверхнева провідність, наприклад, в сенсорних пристроях або електронному друку.

З іншого боку, питомий об'ємний опір $0,37 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при товщині шару 100 мікрон свідчить про якісну електропровідність у всьому об'ємі матеріалу. Такий показник є важливим для застосувань, де необхідна електропровідність у всій масі матеріалу, як, наприклад, у виготовленні електропровідних покриттів або композитних матеріалів.

У наступному етапі дослідження була розглянута модифікація полімерної матриці ПВБ шляхом додавання БС 5%. Цей крок був спрямований на оцінку впливу додавання БС на електричні властивості КЕП табл. 3.24.

Таблиця 3.24

Рецептурний склад та властивості композиції №2

Склад	Вміст компоненту мас. %
ПВБ	25
БС	5
Графіт С0	60
Сажа ХС72	10
Властивості	Значення
Товщина, мкм	100
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	28,10
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,28

Після модифікації полімерної матриці ПВБ з включенням БС, були отримані важливі результати електропровідності цього композиту. Зафіксовані показники питомого поверхневого опору становили 28,10 Ом та питомого об'ємного опору $0,28 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при товщині шару в 100 мікрон.

Ці дані свідчать про позитивну зміну електропровідних властивостей КЕП після додавання БС. Зниження питомого поверхневого та об'ємного опору може бути пов'язане з впливом бакелітової смоли, що може змінювати структуру та електричні властивості композиту.

У наступному етапі нашого дослідження, зосередили увагу на модифікації полімерної матриці ПВБ, додавши до неї 10% БС. Цей крок

мав на меті дослідити підвищений вміст БС на електропровідні властивості композитного матеріалу табл. 3.25.

Таблиця 3.25

Рецептурний склад та властивості композиції №3

Склад	Вміст компоненту мас. %
ПВБ	20
БС	10
Графіт С0	60
Сажа ХС72	10
Властивості	Значення
Товщина, мкм	100
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	38,60
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,39

Після додавання 10% БС до полімерної матриці ПВБ, отримали зміни у показниках електричного опору. Результати показали питомий поверхневий опір 38,60 Ом та питомий об'ємний опір 0,39 Ом*см.

Ці результати свідчать про зміну електропровідних властивостей матеріалу внаслідок модифікації його складу. Збільшення опору може бути пов'язане зі змінами у структурі полімерної матриці, які відбуваються через введення бакелітової смоли.

В наступному етапі дослідження ми зосередилися на вивченні електропровідних властивостей полімерної матриці, зробленої з БС. Особлива увага була приділена дослідженню електропровідності цієї матриці табл. 3.26.

Коли використовували чисту БС як полімерну матрицю, отримали значно вищі показники питомого поверхневого опору 62,10 Ом та питомого об'ємного опору 0,62 Ом*см при товщині матеріалу в 100 мікрон.

Ці результати свідчать про вищий рівень електричного опору чистої бакелітової смоли порівняно з полімерною матрицею ПВБ, а також зі модифікованою матрицею ПВБ та БС.

Рецептурний склад та властивості композиції №4

Склад	Вміст компоненту мас. %
БС	30
Графіт С0	60
Сажа ХС72	10
Властивості	Значення
Товщина, мкм	100
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	62,10
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,62

В наступному етапі дослідження ми зосередилися на вивченні електропровідних властивостей полімерної матриці, НЦ табл. 3.27.

Рецептурний склад та властивості композиції №5

Склад	Вміст компоненту мас. %
НЦ	30
Графіт С0	60
Сажа ХС72	10
Властивості	Значення
Товщина, мкм	100
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	15,35
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,15

В результаті експерименту з нанесенням полімерної матриці на основі НЦ на паперовий субстрат, були отримані наступні дані: показник питомого поверхневого опору склав 15,35 Ом, а питомий об'ємний опір – 0,15 Ом*см.

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.

У наступному етапі дослідження, ми вивчали електропровідні властивості полімерної матриці на основі поліуретану, нанесеної на паперовий субстрат за допомогою роликового аплікатора з анілоксовим валом. Цей вибір цікавий, оскільки поліуретани відрізняються за своїми фізичними та хімічними властивостями, що може істотно вплинути на їхні електропровідні характеристики табл. 3.28.

Таблиця 3.28

Рецептурний склад та властивості композиції №6

Склад	Вміст компоненту мас. %
ПУ	30
Графіт С0	60
Сажа ХС72	10
Властивості	Значення
Товщина, мкм	100
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	32,20
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,32

Ці результати, отримані в ході нашого експерименту з полімерною матрицею на основі ПУ, є важливими для розуміння електропровідних властивостей цієї системи. Показник питомого поверхневого опору в 32,20 Ом та питомий об'ємний опір 0,32 Ом*см при свідчить про певний рівень електричної провідності матеріалу.

У дослідженні ми аналізували електропровідні властивості різних полімерних матриць. Ми дослідили чисту полімерну матрицю ПВБ, яка продемонструвала питомий поверхневий опір 36,50 Ом та питомий об'ємний опір 0,37 Ом*см. При заміні 5% ПВБ часткою БС, показники питомого поверхневого опору покращилися до 28,10 Ом, а питомий об'ємний опір - до 0,28 Ом*см. Однак, при заміні 10% ПВБ часткою БС, показники погіршилися: питомий поверхневий опір збільшився до 38,60 Ом, а питомий об'ємний опір - до 0,38 Ом*см.

У дослідженні також була аналізована матриця з НЦ, яка мала показники питомого поверхневого опору 15,35 Ом та питомого об'ємного опору 0,1535 Ом*см. Полімерна матриця на основі ПУ показала питомий поверхневий опір 32,20 Ом та питомий об'ємний опір 0,32 Ом*см. Ці дані підкреслюють, що електропровідні властивості полімерних матриць значно варіюються залежно від їх хімічного складу та структури, а також від вмісту додаткових компонентів, таких як бакелітова смола.

3.3.4 Дослідження впливу поверхнево активних речовин на електричні властивості композитних електропровідних покриттів

Наступне дослідження зосередилося на впливі додавання лінгосульфонату та силан Dynasylan АМЕО до полімерної матриці. Цікаво, що лінгосульфонат і силан Dynasylan АМЕО використовувались як речовини, які поглинають вологу, а також як дисперсанти, що запобігають агломерації часток сажі. Це дослідження відіграє важливу роль у розумінні того, як додавання поверхнево активних речовин може впливати на фізико-хімічні властивості полімерних матриць, зокрема на електропровідність та взаємодіяти з вологою.

У матеріалознавстві та полімерній хімії, Dynasylan АМЕО часто застосовується у вигляді силанових сполук, які використовуються як поверхнево-активні речовини, зв'язувальні агенти, або крослінкери.

Лінгосульфонат, який був доданий до полімерної матриці у експерименті, міг суттєво вплинути на її властивості. Як відомо, лінгосульфонати використовуються як дисперсанти та агенти для збільшення водопоглинання, що може впливати на електричні властивості полімерів, особливо у випадку, коли вони взаємодіють із провідними наповнювачами, як-от сажа табл. 3.29.

Додавання лінгосульфонату у кількості 2% замість частки ПВБ у експерименті призвело до зміни електропровідності полімерної матриці. Значення питомого поверхневого опору 82,12 Ом та питомого об'ємного опору

0,82 Ом*см при товщині покриття 100 мікрон є вищими порівняно з попередніми варіантами матриць, що свідчить про погіршення електропровідних властивостей цієї конкретної композиції.

Таблиця 3.29

Рецептурний склад та властивості композиції №1

Склад	Вміст компоненту мас. %
ПВБ	28
Лінгосульфат	2
Графіт С0	60
Сажа ХС72	10
Властивості	Значення
Товщина, мкм	100
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	82,12
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,82

Додавання лінгосульфату у кількості 2% замість частки ПВБ у експерименті призвело до зміни електропровідності полімерної матриці. Значення питомого поверхневого опору 82,12 Ом та питомого об'ємного опору 0,82 Ом*см при товщині покриття 100 мікрон є вищими порівняно з попередніми варіантами матриць, що свідчить про погіршення електропровідних властивостей цієї конкретної композиції.

Це може бути обумовлено різними факторами, такими як зміна структури матриці, вплив лінгосульфату на розподіл електричного поля всередині матеріалу, або зміна взаємодії між компонентами матриці. Лінгосульфат може впливати на дисперсію та взаємодію з іншими компонентами матриці, що впливає на електричні властивості.

Наше наступне дослідження з заміщенням 1% частки полімерної матриці на силан Dynasylan АМЕО відіграє ключову роль у вивченні впливу цієї добавки на електричні властивості матеріалу. Силан Dynasylan АМЕО, як відомо, може виступати як зв'язувальний агент і впливати на адгезію, механічні властивості та стійкість композитів. В даному випадку, важливо

зосередитися на тому, як додавання силану впливає на електропровідність полімерної матриці.

Силан Dynasylan AMEO може змінювати внутрішню структуру полімерної матриці, впливаючи на розподіл електропровідних зарядів та можливо, створюючи нові провідні шляхи. Також, він може впливати на взаємодію між полімерами і іншими компонентами системи, такими як наповнювачі або інші добавки. Це може привести до змін в електропровідних властивостях, таких як питомий поверхневий або об'ємний опір табл. 3.30.

Таблиця 3.30

Рецептурний склад та властивості композиції №2

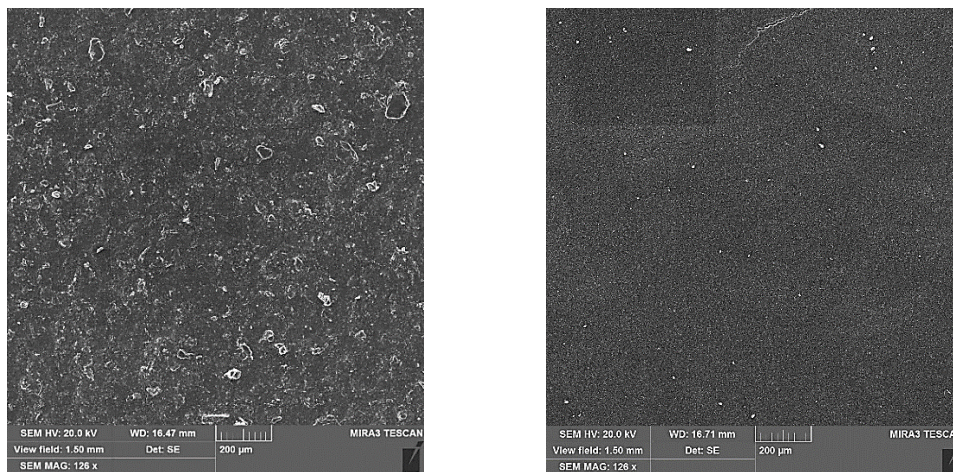
Склад	Вміст компоненту мас. %
ПВБ	29
Dynasylan AMEO	1
Графіт С0	60
Сажа XC72	10
Властивості	Значення
Товщина, мкм	100
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	11,74
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,12

У дослідженні ми розглянули кілька полімерних матриць та їхній вплив на електричну провідність. Спочатку ми вивчили чисту полімерну матрицю ПВБ, яка показала питомий поверхневий опір 36,50 Ом та питомий об'ємний опір 0,37 Ом*см при товщині покриття 100 мікрон. Після модифікації матриці ПВБ часткою БС на 5%, ми отримали покращення показників до питомого поверхневого опору 28,10 Ом та питомого об'ємного опору 0,28 Ом*см. Проте, заміна 10% ПВБ часткою БС привела до погіршення показників: питомий поверхневий опір зріс до 38,60 Ом, а питомий об'ємний опір до 0,39 Ом*см.

Наступним етапом було додавання до полімерної матриці лінгосульфону та силан Dynasytan АМЕО, які використовуються для зниження вологопоглинання та запобігання агломерації часток сажі. Заміщення 2% ПВБ лінгосульфонатом призвело до погіршення показників: питомий поверхневий опір становив 82,12 Ом, а питомий об'ємний опір – 0,82 Ом*см при товщині покриття 100 мікрон.

Натомість, додавання 1% силан Dynasytan АМЕО до полімерної матриці, яка складалася з 29% ПВБ, 10% сажі ХС72 та 60% графіту С0, показало значне покращення електропровідності. Питомий поверхневий опір склав 11,74 Ом, а питомий об'ємний опір – 0,12 Ом*см. Це було значно краще порівняно зі модельною композицією (30% ПВБ, 10% ХС72, 60% С0) та композицією з використанням НЦ.

Для кращого розуміння впливу додавання 1% силан Dynasytan АМЕО на електропровідні властивості КЕП, проведено порівняння між композиціями з використанням силан Dynasytan АМЕО та без. Дослідження структури поверхні покриття здійснено за допомогою електронного мікроскопа рис. 3.32.



а)

б)

Рисунок 3.32 – СЕМ зображення поверхні КЕП: а) без використання Dynasytan АМЕО, б) з використанням силан Dynasytan АМЕО.

З аналізу зображень, отриманих за допомогою електронної мікроскопії, видно, що додавання силан Dynasylan АМЕО робить структуру поверхні КЕП рівномірною. Частки електропровідного наповнювача щільно угрупованні на поверхні, що сприяє збільшенню електропровідності. Це підтверджує ефективність використання силан Dynasylan АМЕО у поліпшенні розподілу та структурної організації наповнювачів у полімерній матриці.

Висновки з розділу про полімерні матриці, що базуються на проведених експериментах, демонструють важливість модифікації полімерних матеріалів для досягнення покращених електропровідних властивостей. Встановлено, що включення 5% БС до полімерної матриці ПВБ значно покращує електропровідність, знижуючи питомий поверхневий та об'ємний опір. Проте, додавання лінгосульфону негативно вплинуло на електропровідність, підвищуючи ці показники. З іншого боку, використання 1% силан Dynasylan АМЕО в матриці з ПВБ, сажею ХС72 та графітом С0 істотно покращило електропровідність, підкреслюючи потенціал силан Dynasylan АМЕО як ефективного компонента для оптимізації полімерних композитів. Ці результати вказують на значущість ретельного підбору компонентів і пропорцій для створення матеріалів із специфічними властивостями та відкривають шляхи для подальших досліджень у цій області.

3.4 Дослідження впливу допоміжних наповнювачів на електричні властивості композитних електропровідних покриттів

Основна мета цього дослідження полягає у вивченні впливу наповнювачів на гомогенність електропровідних покриттів з метою зменшення вмісту традиційних електропровідних наповнювачів. В умовах сучасного промислового розвитку, особливої уваги заслуговує розробка і оптимізація композитних матеріалів, здатних забезпечувати як високу провідність, так і стабільність та довговічність покриттів. Особливий

інтерес у цьому контексті представляє використання карбонату кальцію як потенційного заміника електропровідних наповнювачів, здатного покращити електропровідність покриттів, зменшуючи при цьому їх загальний вміст провідних компонентів.

Декабром, який відомий своїми вогнетривкими властивостями, може значно покращити функціональність КЕП, забезпечуючи підвищену безпеку та ефективність у використанні нагрівальних елементів. Цей розділ сконцентрований на детальному розгляді впливу карбонату кальцію та декабром на електричні характеристики КЕП. Особлива увага буде приділена аналізу зразків покриттів, нанесених за допомогою роликowego аплікатора з анілоксовим валом, з метою визначення оптимальних пропорцій та методів нанесення для досягнення найкращих результатів.

Ми дослідимо, як заміна частини традиційних електропровідних наповнювачів на частину карбонату кальцію OF800 і як впливає на однорідність та електропровідні властивості покриттів, встановлюючи важливість цих компонентів у покращенні якості та експлуатаційних характеристик КЕП.

В ході Досліджень впливу карбонату кальцію OF800 на електропровідні властивості покриттів використовувалася модельна рецептура, яка складалася з 30% ПВБ, 60% графіту С0 та 10% сажі ХС72. З метою аналізу впливу карбонату кальцію, в цьому варіанті експерименту були внесені зміни: 10% карбонату кальцію OF800 було додано замість частини графіту С0.

Така модифікація рецептури мала на меті визначити, як заміна частини електропровідного наповнювача (графіту) на діелектричний наповнювач (карбонату кальцію OF800) впливає на електропровідні характеристики покриттів. Припускається, що така заміна може знизити загальну провідність покриття через зменшення кількості провідних частинок.

Очікується, що результати цього дослідження допоможуть зрозуміти, наскільки ефективно можна використовувати карбонат кальцію як заміник графіту у формуванні електропровідних покриттів і який вплив така заміна має на електричні властивості кінцевого продукту табл. 3.31.

В результаті проведення експерименту з нанесенням КЕП на паперовий субстрат, де 10% карбонату кальцію було використано за рахунок графіту С0, були отримані значущі дані щодо електропровідних властивостей покриттів при різних товщинах.

Таблиця 3.31

Рецептурний склад та властивості композиції №1

Склад	Вміст компоненту мас. %	
ПВБ	30	
OF800	10	
Графіт С0	50	
Сажа ХС72	10	
Властивості	Товщина, мкм	
	50	100
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	82,12	43,58
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,41	0,44

При товщині покриття 100 мікронів, питомий поверхневий опір склав 43,58 Ом, що свідчить про досить високу електропровідність матеріалу для даної товщини покриття. З іншого боку, питомий об'ємний опір склав 0,44 Ом*см, що також є індикатором ефективності матеріалу у термінах провідності на даній товщині.

Цікаво, що при зменшенні товщини покриття до 50 мікрон, спостерігається значне збільшення питомого поверхневого опору, який складає 82,12 Ом. Це може бути пов'язано з тим, що при меншій товщині покриття, відстань між електропровідними частинками збільшується, що

ускладнює проходження електричного струму. Питомий об'ємний опір падає до 0,41 Ом*см.

Також важливо відзначити, що використання карбонату кальцію як наповнювача в полімерній матриці може бути ефективним засобом для досягнення бажаних електропровідних характеристик у КЕП.

У наступному експерименті була проведена заміна частини полімерного зв'язуючого ПВБ карбонату кальцію OF800 у стандартній рецептурі електропровідних покриттів. Ця модифікація полягала у заміні 10% ПВБ на аналогічний відсоток карбонату кальцію OF800. Водночас, карбонат кальцію як діелектричний матеріал може змінити електричні та механічні властивості покриття табл. 3.32.

Таблиця 3.32

Рецептурний склад та властивості композиції №2

Склад	Вміст компоненту мас. %	
ПВБ	20	
OF800	10	
Графіт С0	60	
Сажа ХС72	10	
Властивості	Товщина, мкм	
	50	100
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	41,32	29,53
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,20	0,30

У результаті експерименту з включенням 10% карбонату кальцію OF800 в склад електропровідних покриттів нанесених на паперовий субстрат були отримані цікаві дані що вказують на вплив карбонату кальцію на електропровідні властивості покриттів при товщині покриття 100 мікрон показник питомого поверхневого опору склав 29,53 Ом питомий об'ємний опір становив 0,30 Ом*см при зменшенні товщини покриття до 50 мікрон показник питомого поверхневого опору збільшився до 41,32 Ом питомий об'ємний опір

знизився до $0,20 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ці результати вказують на те що зменшення товщини покриття веде до збільшення питомого поверхневого опору що є очікуваним оскільки тонші покриття зазвичай мають вищий опір однак зниження питомого об'ємного опору при зменшенні товщини покриття є цікавим явищем яке може вказувати на зміни в структурі або розподілі електропровідних компонентів у покритті ці дані свідчать про значний вплив карбонату кальцію на електропровідні властивості покриттів і її потенціал як модифікуючого агента у виробництві КЕП.

Після з'ясування що карбонат кальцію знизив питомі показники опору порівняно з модельною рецептурою зробили електронну мікроскопію для зразка №2 рис. 3.33.

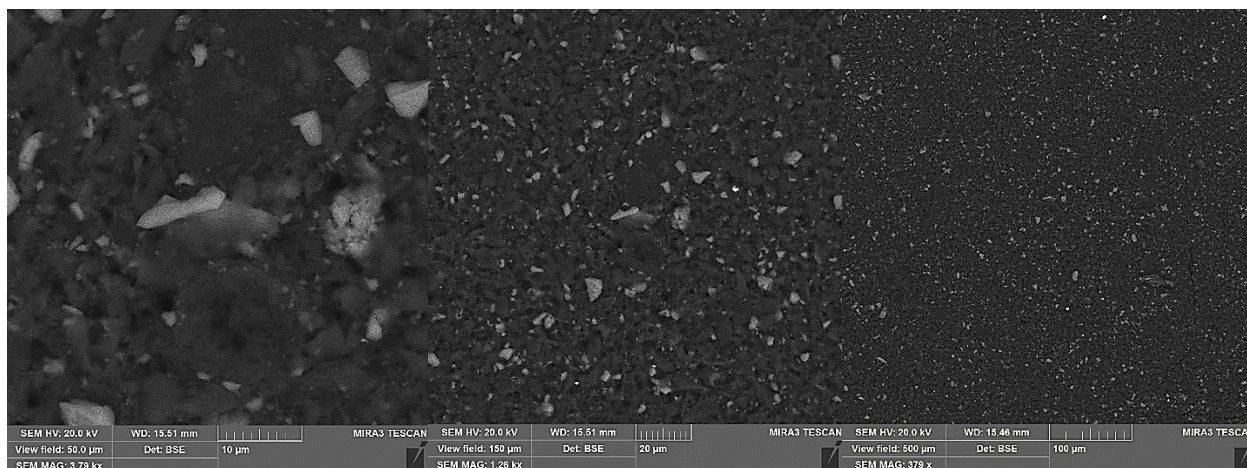


Рисунок 3.33 – СЕМ зображення поверхні КЕП при різних збільшеннях зразка №2.

Знімок був зроблений з детектором зворотньорозсіяних електронів (BSE) контраст на зображенні обумовлено локальною щільністю, отже важчі включення виглядають світлими. Таким чином, ми вважаємо, що білі частинки на знімку — це карбонат кальцію, який рівномірно розподілений по поверхні КЕП. Ми припускаємо, що діелектричний вміст карбонату кальцію утворює діелектричні домени, що сприяє формуванню більш щільної структури

електропровідного наповнювача. Це, у свою чергу, призводить до зниження електричного опору, та покращення електропровідності матеріалу.

Основною метою наступного експерименту було з'ясування, як декабром впливає на електропровідні властивості КЕП. Дослідження фокусувалося на аналізі того, як додавання декаброму впливає на провідність цих матеріалів, а також на взаємодію між декабромом та іншими компонентами покриттів, такими як сажа ХС72 та нанотрубки CNT7000. У цьому контексті, було важливо зрозуміти, чи декабром здатен збільшити або зменшити електропровідність матеріалу табл. 3.33.

Таблиця 3.33

Рецептурний склад та властивості композиції №3

Склад	Вміст компоненту мас. %	
ПВБ	25	
Декабром	15	
Графіт С0	40	
Сажа ХС72	15	
CNT7000	5	
Властивості	Товщина, мкм	
	50	80
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	69,67	52,49
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,35	0,42

В результаті експерименту з використанням 15% декабромом в комбінації з підвищеним вмістом сажі ХС72 і нанотрубок CNT7000 на паперовий субстрат, було отримано КЕП. При товщині покриття 80 мікрон, показник питомого поверхневого опору досяг 52,49 Ом, а питомий об'ємний опір склав 0,42 Ом*см. Зменшення товщини покриття до 50 мікрон призвело до збільшення питомого поверхневого опору до 69,67 Ом та питомого об'ємного опору до 0,35 Ом*см.

У наступному експерименті збільшили частку полімерного зв'язуючого ПВБ, за рахунок вмісту декабромом. Цей підхід мав на меті дослідити, як зміна

пропорцій компонентів впливає на електропровідні властивості та фізичні характеристики КЕП. Зокрема, було цікаво визначити, чи збільшення частки ПВБ при нижчому вмісті декабром змінює опір матеріалу табл. 3.34.

У цьому експерименті було використано 10% декабром разом з підвищеним вмістом сажі ХС72 і нанотрубок CNT7000 для створення КЕП на паперовому субстраті. Дослідження показало, що при товщині покриття 80 мікрон питомий поверхневий опір склав 39,73 Ом, а питомий об'ємний опір – 0,32 Ом*см. При товщині покриття 50 мікрон показник питомого поверхневого опору збільшився до 53,55 Ом, в той час як питомий об'ємний опір зменшився до 0,27 Ом*см. Ці результати свідчать про значний вплив товщини покриття на електропровідні властивості, зокрема, зменшення товщини покриття призводить до збільшення поверхневого опору, але знижує об'ємний опір.

Таблиця 3.34

Рецептурний склад та властивості композиції №4

Склад	Вміст компоненту мас. %	
	ПВБ	30
Декабром	10	
Графіт С0	40	
Сажа ХС72	15	
CNT7000	5	
Властивості	Товщина, мкм	
	50	80
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	53,55	39,73
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,27	0,32

Використання карбонату кальцію OF800 замість частини полімерного ПВБ призвело до формування покриттів з різними показниками електричного опору в залежності від товщини. При товщині покриття 100 мікрон питомий поверхневий опір становив 26,18 Ом а питомий об'ємний опір 0,26 Ом*см. При зменшенні товщини до 50 мікрон показник поверхневого опору зріс до 41,32

Ом тоді як об'ємний опір знизився до 0,21 Ом*см. Це вказує на те що карбонат кальцію OF800 може підвищувати опір матеріалу особливо при менших товщинах покриття.

Експерименти з декабромом показали що 15% декабромом використано з сажею XC72 та нанотрубками CNT7000 При товщині 80 мікрон показник поверхневого опору склав 52,49 Ом а об'ємний опір 0,42 Ом*см. При 50 мікронах ці показники стали 69,67 Ом і 0,35 Ом*см відповідно У іншому експерименті використовувалося 10% декабромом що призвело до нижчих значень опору 39,73 поверхневий і 0,32 об'ємний опір при товщині 80 мікрон і 53,55 поверхневий і 0,27 об'ємний опір при товщині 50 мікрон.

Виходячи з цих даних можна зробити висновок що карбонат кальцію OF800 як наповнювач в комбінації з іншими матеріалами має тенденцію до зниження електричного опору в порівнянні з декабромом що робить його більш ефективним в плані електропровідності для КЕП.

Проведення серії експериментів з використанням сажі BP2000 у комбінації з карбонатом кальцію OF800 і декабромом, як окремо, так і в суміші, відкриває нові перспективи у розумінні властивостей електропровідного покриття.

Використання ракельного аплікатора для нанесення електропровідного композитного покриття з товщинами 50, 75 і 100 мікрон на ПЕТ-плівку із додаванням 10% карбонату кальцію OF800 має ряд важливих аспектів табл. 3.35.

Після нанесення електропровідного композитного покриття ракельним аплікатором з товщинами 50, 75 і 100 мікрон на ПЕТ-плівку і подальшої сушки були отримані показники товщини покриття 25, 30 і 35 мікрон відповідно це вказує на зменшення фактичної товщини покриття після процесу сушки що є звичайним явищем через втрату розчинника або вологи. Питомий поверхневий опір покриття при цих товщинах виявився таким при 25 мікрон 452,10 Ом при 30 мікрон 403,09 Ом та при 35 мікрон

307,28 Ом вказуючи на зниження питомого поверхневого опору зі збільшенням товщини покриття що може свідчити про краще розподілення електропровідних часток у товщому шарі Також були виміряні показники питомого об'ємного опору при 25 мікронах 1,13 Ом*см при 30 мікронах 1,21 Ом*см та при 35 мікронах 1,08 Ом*см ці результати показують що з товщиною покриття змінюються і його опору, зокрема, при 35 мікронах відмічена найменший об'ємний опір що також може бути важливим.

Таблиця 3.35

Рецептурний склад та властивості композиції №5

Склад	Вміст компоненту мас. %		
ПВБ	20		
OF800	10		
Графіт С0	60		
Сажа ВР2000	10		
Властивості	Товщина, мкм		
	25	30	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	452,10	403,09	307,28
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	1,13	1,21	1,08

У наступному експерименті заміна частки полімерної матриці на графіт може суттєво вплинути на електропровідні властивості КЕП. Графіт відомий своїми високими електропровідними властивостями, тому це може знизити питомий опір покриття.

Ця заміна може змінити як поверхневий, так і об'ємний опір. Через вищу електропровідність графіту, можна очікувати зниження питомого поверхневого опору покриття. Щодо питомого об'ємного опору, він також може знизитися, оскільки графіт забезпечить краще провідність у всьому об'ємі матеріалу.

Використання ракельного аплікатора для нанесення електропровідного композитного покриття з товщинами 50, 75 і 100 мікрон

на ПЕТ-плівку із додаванням 10% карбонату кальцію OF800 має ряд важливих аспектів табл. 3.36.

Проведено експеримент з нанесенням електропровідного композитного покриття на ПЕТ-плівку за допомогою ракельного аплікатора з товщинами 50, 75 і 100 мікрон після процесу сушіння фактичні товщини покриття склали 25, 30 і 35 мікрон відповідно що свідчить про зменшення фактичної товщини покриття після сушіння через втрату розчинника або вологи показники питомого поверхневого опору були виміряні як 6785,84 Ом при товщині покриття 25 мікрон 5894,01 Ом при 30 мікронах і 2781,44 Ом при 35 мікронах питомий об'ємний опір складав 16,96 Ом*см при товщині покриття 25 мікрон 17,68 Ом*см при 30 мікронах і 9,74 Ом*см при 35 мікронах ці дані демонструють залежність питомих опорів від товщини покриття.

Таблиця 3.36

Рецептурний склад та властивості композиції №6

Склад	Вміст компоненту мас. %		
ПВБ	30		
OF800	10		
Графіт С0	50		
Сажа ВР2000	10		
Властивості	Товщина, мкм		
	25	30	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	6785,84	5894,01	2781,45
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	16,96	17,68	9,73

Дані вказують на те, що заміна графіту на карбонат кальцію в КЕП негативно впливає на їхню електропровідність. Це можна побачити з вимірювань питомого поверхневого та об'ємного опору, які підвищуються при використанні карбонату кальцію замість полімерної матриці.

Зменшення частки карбонату кальцію OF800 до 5% у наступному дослідженні, замість 10%, як у попередніх, може виявитись ефективним у

покращенні електропровідних властивостей КЕП. Це зниження кількості карбонату кальцію дозволяє збільшити частку інших компонентів, таких як полімерна матриця та графіт. Такий підхід допомагає краще зрозуміти вплив кожного компонента на загальні властивості покриття та визначити оптимальні пропорції для досягнення бажаних характеристик матеріалу.

Використання ракельного аплікатора для нанесення електропровідного композитного покриття з товщинами 50, 75 і 100 мікрон на ПЕТ-плівку із додаванням 5% карбонату кальцію OF800 має ряд важливих аспектів табл. 3.37.

Таблиця 3.37

Рецептурний склад та властивості композиції №7

Склад	Вміст компоненту мас. %		
ПВБ	30		
OF800	5		
Графіт С0	55		
Сажа ВР2000	10		
Властивості	Товщина, мкм		
	25	30	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	2384,1	2013,24	1116,99
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	5,96	6,04	3,91

Проведено експеримент з нанесенням електропровідного композитного покриття ракельним аплікатором на ПЕТ-плівку з різними товщинами – 50, 75, і 100 мікрон, після чого покриття було висушене. В результаті отримано показники товщини покриття 25 мікрон, 30 мікрон, і 35 мікрон відповідно для кожної із зазначених товщин аплікації. Питомий поверхневий опір покриття виміряно і виявлено, що він становить 2384,10 Ом при 25 мікронах, 2013,24 Ом при 30 мікронах та 1116,99 Ом при 35 мікронах. Також визначено питомий об'ємний опір покриття, який складає 5,96 Ом*см при 25 мікронах, 6,04 Ом*см при 30 мікронах, і 3,91 Ом*см при 35 мікронах.

У наступному експерименті увага була зосереджена на заміні частини полімерного зв'язуючого на частку карбонату кальцію. Це дослідження було спрямоване на вивчення впливу такої заміни на властивості електропровідних композитних покриттів. Метою було визначити, як внесення карбонату кальцію впливає на електропровідність табл. 3.38.

Після аплікування електропровідного композитного покриття ракельним аплікатором з різними товщинами 50, 75 та 100 мікрон на ПЕТ-плівку і виконання процесу сушки було встановлено, що товщина покриття складає 25, 30 і 35 мікрон відповідно, що свідчить про значне зменшення товщини після сушіння, результати вимірювання показали, що питомий поверхневий опір становив 2966,87 Ом при 25 мікронах, 2309,04 Ом при 30 мікронах та 1589,40 Ом при 35 мікронах, також було визначено питомий об'ємний опір, який склав 7,41 Ом*см при 25 мікронах, 6,93 Ом*см при 30 мікронах та 5,56 Ом*см при 35 мікронах, ці дані вказують на залежність електропровідних властивостей покриття від його товщини.

Таблиця 3.38

Рецептурний склад та властивості композиції №8

Склад	Вміст компоненту мас. %		
ПВБ	25		
OF800	5		
Графіт С0	50		
Сажа ВР2000	10		
Властивості	Товщина, мкм		
	25	30	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	2966,88	2309,04	1589,40
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	7,42	6,93	5,56

Аналізуючи дані виявлено що при додаванні 5% карбонату кальцію OF800 до композиту зменшення питомого поверхневого та об'ємного опору є значним у порівнянні з випадком коли використовувалося 10% карбонату кальцію це свідчить про те що менша кількість карбонату кальцію сприяє

кращій електропровідності композитного покриття у разі додавання карбонату кальцію у кількості 10% разом із сажею ВР2000 засвідчено збільшення електричного опору що підтверджує гіпотезу про негативний вплив великої кількості карбонату кальцію на електропровідні властивості композиту.

В наступному дослідженні ми вирішили додати декабром до композиції з сажею ВР2000 з метою вивчення впливу цього наповнювача на електропровідні та інші властивості композиту. Цей експеримент був направлений на розуміння того, як декабром, відомий своїми вогнетривкими властивостями, вплине на загальні характеристики матеріалу, зокрема на його електропровідність табл. 3.39.

Таблиця 3.39

Рецептурний склад та властивості композиції №9

Склад	Вміст компоненту мас. %		
ПВБ	20		
Декабром	15		
Графіт С0	55		
Сажа ВР2000	10		
Властивості	Товщина, мкм		
	25	30	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	1951,43	1796,90	1258,27
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	4,88	5,39	4,40

Після застосування електропровідного композитного покриття на ПЕТ-плівку ракельним аплікатором з вихідними товщинами 50, 75 і 100 мікрон, кінцеві товщини покриття становили 25, 30 і 35 мікрон відповідно. Вимірювання показали питомий поверхневий опір 1951,43 Ом при товщині покриття 25 мікрон, 1796,9 Ом при 30 мікронах і 1258,27 Ом при 35 мікронах. Щодо питомого об'ємного опору, то він склав 4,88 Ом*см при 25 мікронах, 5,39 Ом*см при 30 мікронах і 4,40 Ом*см при 35 мікронах.

У наступному експерименті увага була зосереджена на заміні частини графіту на частку декаброма. Це дослідження було спрямоване на вивчення

впливу такої заміни на властивості електропровідних композитних покриттів. Метою було визначити, як внесення карбонату кальцію впливає на електропровідність табл. 3.40.

Після процедури нанесення електропровідного композитного покриття на ПЕТ-плівку, використовуючи ракельний аплікатор з первинними товщинами 50, 75 та 100 мікрон та подальшою сушкою, кінцеві товщини покриття склали 25, 30 та 35 мікрон відповідно. В результаті вимірювань було встановлено, що питомий поверхневий опір становить 1704,19 Ом при товщині покриття 25 мікрон, 1532,00 Ом при 30 мікронах і 1041,94 Ом при 35 мікронах. Щодо питомого об'ємного опору, він виявився 4,26 Ом*см при 25 мікронах, 4,60 Ом*см при 30 мікронах і 3,65 Ом*см при 35 мікронах.

Таблиця 3.40

Рецептурний склад та властивості композиції №10

Склад	Вміст компоненту мас. %		
ПВБ	20		
Декабром	20		
Графіт С0	50		
Сажа ВР2000	10		
Властивості	Товщина, мкм		
	25	30	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	1704,19	1532,00	1041,94
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	4,26	4,60	3,65

В ході досліджень було встановлено, що використання 20% декабром у позитивно впливає на показники питомого поверхневого та об'ємного опору. З огляду на це, прийнято рішення про заміщення ще 5% графіту на декабром у композиції, з метою подальшого вивчення впливу цієї зміни на електричні властивості покриття табл. 3.41.

З проведених досліджень з різним вмістом Декабром у як наповнювача в електропровідному композиті зробили наступні висновки. При першому вимірюванні з 15% Декабром показники питомого поверхневого опору

склали 1951,43 Ом, 1796,90 Ом та 1258,27 Ом при товщинах покриття 25, 30 та 35 мікрон відповідно, а питомий об'ємний опір – 4,88 Ом*см, 5,39 Ом*см та 4,40 Ом*см. Під час другого вимірювання з 20% Декабром показники питомого поверхневого опору зросли до 2719,64 Ом, 2061,80 Ом та 1849,88 Ом, а питомий об'ємний опір – до 6,80 Ом*см, 6,19 Ом*см та 6,47 Ом*см. Нарешті, третє вимірювання з 25% Декабром виявило питомий поверхневий опір 2719,64 Ом, 2061,80 Ом, 1849,88 Ом і питомий об'ємний опір 6,80 Ом*см, 6,19 Ом*см, 6,47 Ом*см. Це підтверджує, що збільшення вмісту Декабром до 20% в композиті якісно впливає на електропровідність.

Таблиця 3.41

Рецептурний склад та властивості композиції №11

Склад	Вміст компоненту мас. %		
ПВБ	20		
Декабром	25		
Графіт С0	45		
Сажа ВР2000	10		
Властивості	Товщина, мкм		
	25	30	35
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	2719,64	2061,80	1849,88
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	6,80	6,19	6,47

У фінальному дослідженні впливу наповнювача на КЕП, були створені зразки з вмістом Декабром та карбонату кальцію OF800, а також із застосуванням сажі ВР2000. Цей метод нанесення дозволяє точно контролювати кількість матеріалу, що наноситься, і забезпечує рівномірне покриття. Застосування аплікатора з анілоксовим валом сприяє ефективному розподілу композиту по поверхні, що важливо для точності електропровідних властивостей готових зразків. Це дослідження дозволило оцінити вплив різних наповнювачів на характеристики покриття, враховуючи їхній вплив на електропровідність табл. 3.42.

У фінальному дослідженні впливу наповнювача на гібридні електропровідні покриття були використані зразки з вмістом Декабром та карбонату кальцію OF800, а також сажі ВР2000. Вимірювання показали, що при товщині покриття 85 мікрон питомий поверхневий опір становив 67,42 Ом, а питомий об'ємний опір - 0,57 Ом*см. При товщині покриття 100 мікрон питомий поверхневий опір збільшився до 79,25 Ом, а питомий об'ємний опір - до 0,79 Ом*см. Ці результати свідчать про те, що зі збільшенням товщини покриття відбувається зростання як питомого поверхневого, так і об'ємного опору.

Таблиця 3.42

Рецептурний склад та властивості композиції №12

Склад	Вміст компоненту мас. %	
ПВБ	20	
Декабром	20	
Графіт С0	40	
Сажа ВР2000	10	
OF800	10	
Властивості	Товщина, мкм	
	85	100
Питомий поверхневий електричний опір, Ом/□	67,42	79,25
Питомий об'ємний електричний опір, Ом*см	0,57	0,79

У рамках нашого дослідження ми детально вивчили вплив Декабром і карбонату кальцію OF800 на електропровідні властивості КЕП. Використання цих матеріалів у поєднанні з сажею ВР2000 та ХС72 дозволило нам досягти значних змін у питомому поверхневому та об'ємному опорах покриття, залежно від їх товщини. Це демонструє потенціал використання таких комбінацій у розробці нових матеріалів з регульованими електропровідними властивостями, що можуть бути корисними у широкому спектрі застосувань.

На основі аналізу отриманих даних з експериментів з модифікацією полімерних матриць, особливу увагу привертає ефективність композиції, що містить 1% силану Dynasylan АМЕО, 29% ПВБ, 10% сажі ХС72 та 60% графіту С0. Це співвідношення продемонструвало значне покращення електропровідності, що свідчить про її високий потенціал у якості КЕП. Зниження питомого поверхневого опору до 11,74 Ом і питомого об'ємного опору до 0,12 Ом*см вказує на високу ефективність цієї композиції у порівнянні з іншими випробуваними варіантами. У зв'язку з цим, обрано цю композицію як основу для подальших досліджень.

РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТНИХ ПОКРИТТІВ ТА СТВОРЕННЯ НАГРІВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ЇХ ОСНОВІ

4.1 Залежність електричного опору від температури композитного електропровідного покриття

Вивчення електропровідності КЕП та її залежності від температури покриття є важливим аспектом у створенні нагрівальних елементів. Основним параметром, який оцінює цю залежність, є температурний коефіцієнт опору (ТКО). ТКО демонструє, як змінюється електричний опір матеріалу при коливаннях температури. ТКО може бути як позитивним, так і негативним. Позитивний ТКО означає, що опір матеріалу зростає при підвищенні температури, а негативний ТКО, навпаки, що опір зменшується з підвищенням температури.

Метою роботи є встановлення залежності ТКО від різних складових КЕП та визначення, які комбінації матеріалів забезпечують оптимальні електропровідні властивості при коливанні температури КЕП [257].

У дослідженні було використано зразки з попередніх експериментів. Дані зразки були виготовлені на основі таких полімерів, як ПВБ, НЦ, та БС. Зразки композитів мали однаковий склад: 60% графіту марки С0, 10% сажі марки ХС72, та 30% полімерного зв'язуючого (Табл. 4.1). Та окрему рецептуру КЕП та підвищеним вмістом ПВБ. Товщина всіх КЕП складала 100 мікрон.

Даний спектр полімерних матриць, дозволяє дослідити вплив різних типів полімерів на ТКО КЕП. Вимірювання проводили на нагрівальному столику, використовуючи чотириелектродний метод (метод Кельвіна) за допомогою пристрою RSPRO RM-804.

№ композиції	Вміст компонентів, % мас.				
	Полімерна матриця			Наповнювач	
	ПВБ	БС	НЦ	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	40	-	-	40	20

У рамках дослідження було зосереджено увагу на діапазоні температур від 30 до 120 градусів Цельсія. Цей діапазон був обраний з метою ретельного вивчення поведінки питомого поверхневого опору КЕП при різних температурних режимах типових для нагрівачів.

На першому етапі вивчали вплив полімерної матриці - ПВБ (Рис. 4.1).

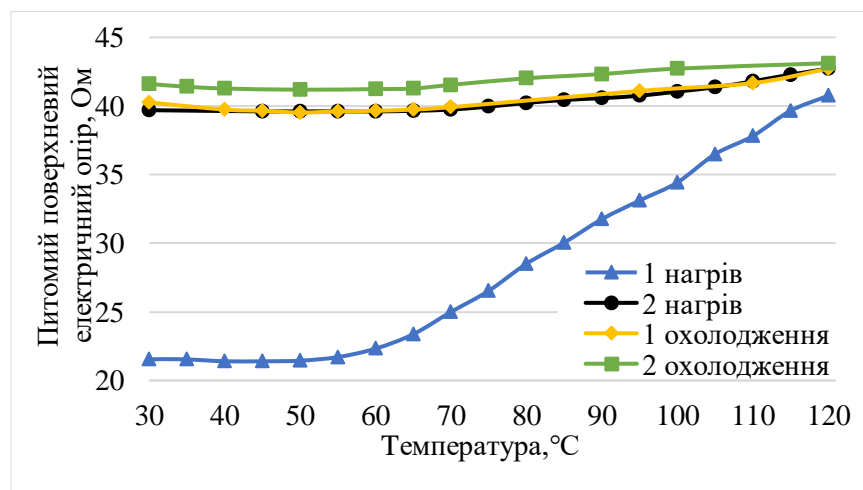


Рисунок 4.1 - Залежність питомого поверхневого опору від температури КЕП на основі ПВБ (композиція №1).

При першому циклі прогріву КЕП на основі ПВБ (композит №1), відбувається збільшення опору. Схожа залежність також спостерігається на

першому циклі прогріву в інших КЕП (композити №2-№6). Дане підвищення опору може вказувати на випаровування летких речовин із структури КЕП. Леткі речовини могли залишитись в структурі КЕП під час його виробництва або як результат недостатнього висушування КЕП при кімнатній температурі. Отриманий показник ТКО рівний $0,000957 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ у відсотках $0,0957\%$ свідчить про позитивний ТКО для даного КЕП. Це означає, що зі зростанням температури питомий поверхневий опір матеріалу збільшується. Це явище може бути ймовірно зумовлено різними факторами, такими як термічно індукване розширення полімерної матриці, що призводить до збільшення відстані між провідними частинками (наприклад, графіт або сажа), а також зміною міжмолекулярних взаємодій.

Наступним етапом стало часткове змінення ПВБ іншим полімером - БС (композити №2-№3).

У композиті №2, у порівнянні з композитом №1, полімерна матриця ПВБ частково була замінена на БС 5% мас. Вимірювання поверхневого питомого електричного опору для композиту зображено на рисунку 4.2.

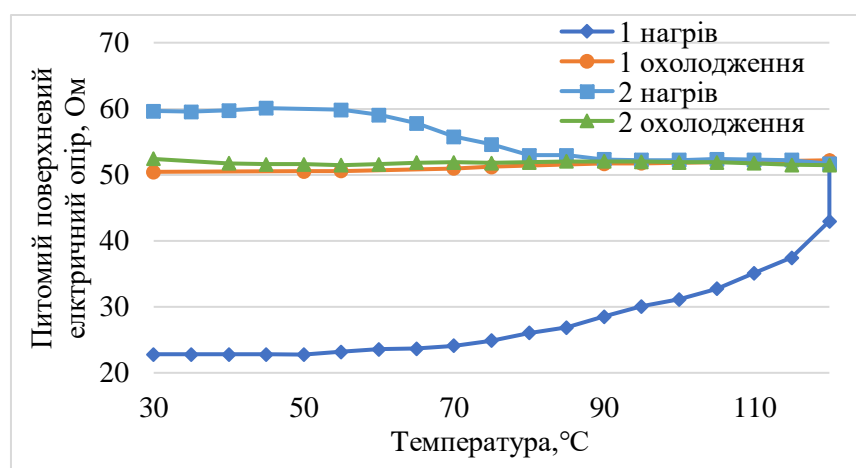


Рисунок 4.2 - Залежність питомого поверхневого опору від температури КЕП на основі ПВБ з БС (композиція №2).

Отримані показники ТКО $-0,001518 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ або $-0,1518\%$ на градус Цельсія для зразка модифікованим полімерною матрицею БС вказують на негативний

температурний коефіцієнт опору. На обох графіках для зразків №1, №2 стабільний питомий опір у широкому діапазоні температур, що свідчить про високу температурну стабільність електропровідних покриттів. З підвищенням температури питомий опір КЕП на основі ПВБ (композиція №1) не значно зростає (позитивний ТКО), в той час як КЕП ПВБ з БС (композит №2) показує зменшення опору (негативний ТКО).

У наступному КЕП(композит №3) на основі ПВБ з БС було збільшено вміст БС з 5% до 10%, відповідно вміст ПВБ знизився з 25% до 20%. Метою експерименту стало вивчення, вплив вмісту бакелітової смоли на ТКО КЕП. Результати вимірювання питомого поверхневого опору від температури для даного ЕКПК наведено на рис. 4.3.

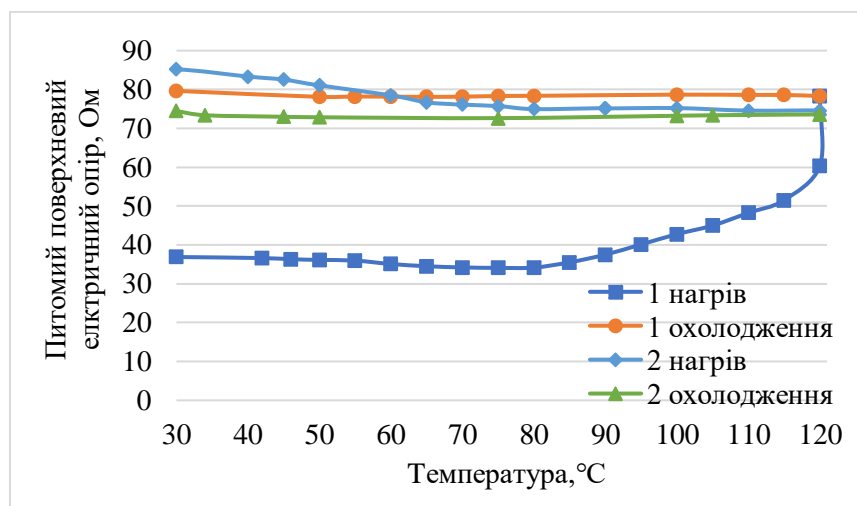


Рисунок 4.3 - Залежність питомого поверхневого опору від температури КЕП на основі ПВБ з БС (композиція №3).

Отримані результати для композиту №3, де ТКО $-0,001509\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, або $-0,1509\%$ на градус Цельсія, свідчать про значне підвищення температурної чутливості КЕП при збільшенні вмісту БС до 10%. Дане явище може бути викликано кількома факторами. По-перше, бакелітова смола має високу термічну стабільність порівняно з ПВБ, що може впливати на ТКО. По-друге, збільшення вмісту БС може змінювати мікроструктуру композиції, ймовірно зменшуючи термічну чутливість його електропровідних властивостей.

Як можемо спостерігати, що модифікація полімерної матриці ПВБ шляхом додавання бакелітової смоли БС впливає на температурну чутливість КЕП. Збільшення вмісту БС у матриці ПВБ з 0% до 10% призводить до зміни ТКО з позитивним значенням, що свідчить про збільшення опору з температурою, до негативного, що вказує на зменшення опору при підвищенні температури.

Так у композита №1 з ПВБ без додавання БС показує ТКО близько $0,000957^{\circ}\text{C}^{-1}$, тоді як у композита №3 при додаванні 10% БС ТКО стає $-0,001509^{\circ}\text{C}^{-1}$. Це незначне зниження ТКО зі збільшенням вмісту БС може свідчити про вплив термореактивних властивостей бакеліту на загальну структуру та електричні властивості КЕП.

Такі результати мають практичне значення, оскільки вони вказують на можливість регулювання ТКО в КЕП шляхом модифікації їх складу.

Наступним етапом було дослідження БС на ТКО КЕП. Композит № 4 на основі БС. Результати вимірювань питомого поверхневого електричного опору від температури наведено на рис. 4.4.

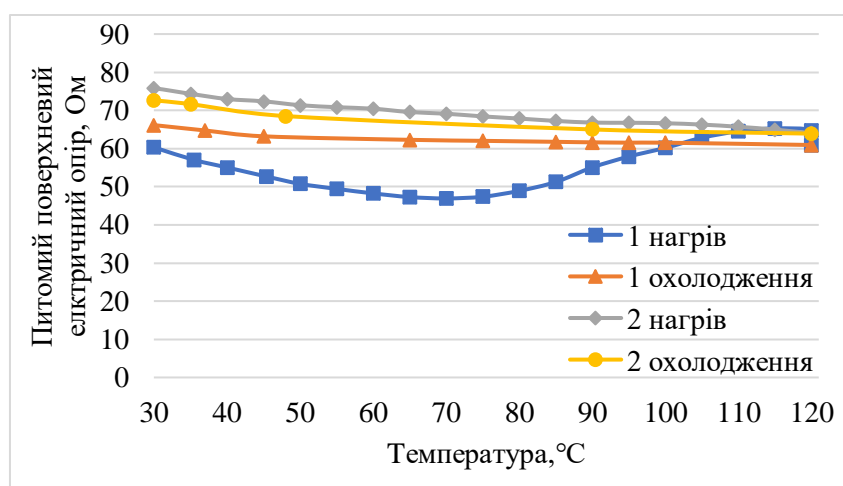


Рисунок 4.4 - Залежність питомого поверхневого опору від температури КЕП на основі БС (композит №4).

Отримані показники ТКО $-0,001744^{\circ}\text{C}^{-1}$ та $-0,1744\%$ на градус Цельсія вказують на низьку температурну чутливість даного КЕП (композиція №4),

особливо в контексті вмісту БС (30%). Це свідчить про значні зміни електропровідних властивостей полімерної матриці під впливом температури. Зокрема, бакеліт, ймовірно як термореактивний полімер, може формувати більш міцні та стійкі хімічні зв'язки, що впливає на ТКО при нагріванні.

Ці результати демонструють значення складу полімерної матриці у формуванні електропровідних та термічних властивостей КЕП.

Збільшення вмісту БС у полімерній матриці ПВБ призводить до підвищення температурної чутливості КЕП, як показано зміною ТКО від $-0,001509^{\circ}\text{C}^{-1}$ (композиція №3) до $-0,001744^{\circ}\text{C}^{-1}$ (композиція №4) при збільшенні вмісту БС з 10% до 30%. Негативний ТКО свідчить про те, що з підвищенням температури опір покриттів зменшується, що може бути ймовірно пов'язано із термічними характеристиками БС, особливо її термореактивними властивостями, що забезпечують більшу стабільність зв'язків при нагріванні.

Наступним було дослідження впливу полімерної матриці – НЦ на ТКО (композиція № 5). Дослідження ТКО з урахуванням високого вмісту нітроцелюлози допоможе зрозуміти, як змінюється провідність КЕП при різних температурах результати досліджень наведено на рис. 4.5.

Для композиції №5 отримали ТКО $-0,002928^{\circ}\text{C}^{-1}$. При використанні НЦ спостерігається значне збільшення негативного ТКО, що свідчить про більш виражене зменшення опору покриттів при нагріванні. Нітроцелюлоза має більшу температурну чутливість порівняно з бакелітовою смолою, що може бути ймовірно пов'язано з її хімічною структурою та фізичними властивостями.

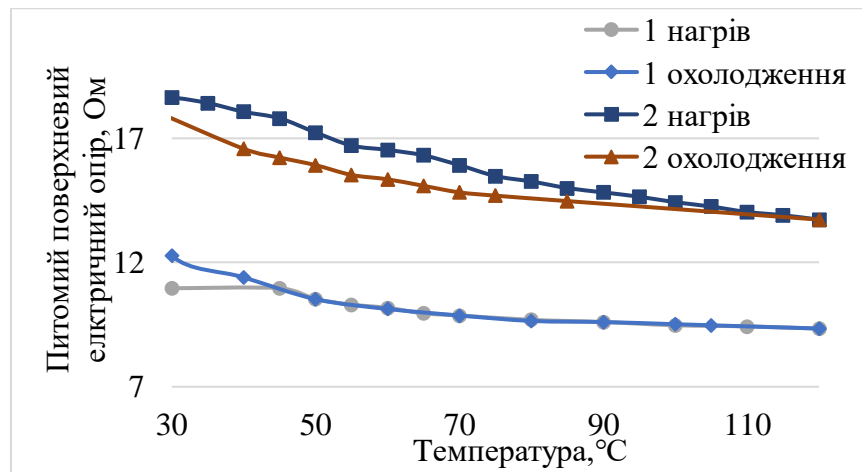


Рисунок 4.5 - Залежність питомого поверхневого опору від температури КЕП на основі НЦ (композиція №5).

У порівнянні з попередніми результатами, НЦ(композиція №5) дає найбільшу зміну ТКО, тоді як використання БС 30% (№4) дає помірне збільшення негативного ТКО. Це підтверджує, що матриця значно впливає на температурну чутливість КЕП.

Досліджувалося вміст матриці ПВБ 40%. Метою було визначити, як збільшений вмісту ПВБ впливає на ТКО в композиції КЕП результати досліджень наведено на рис. 4.6.

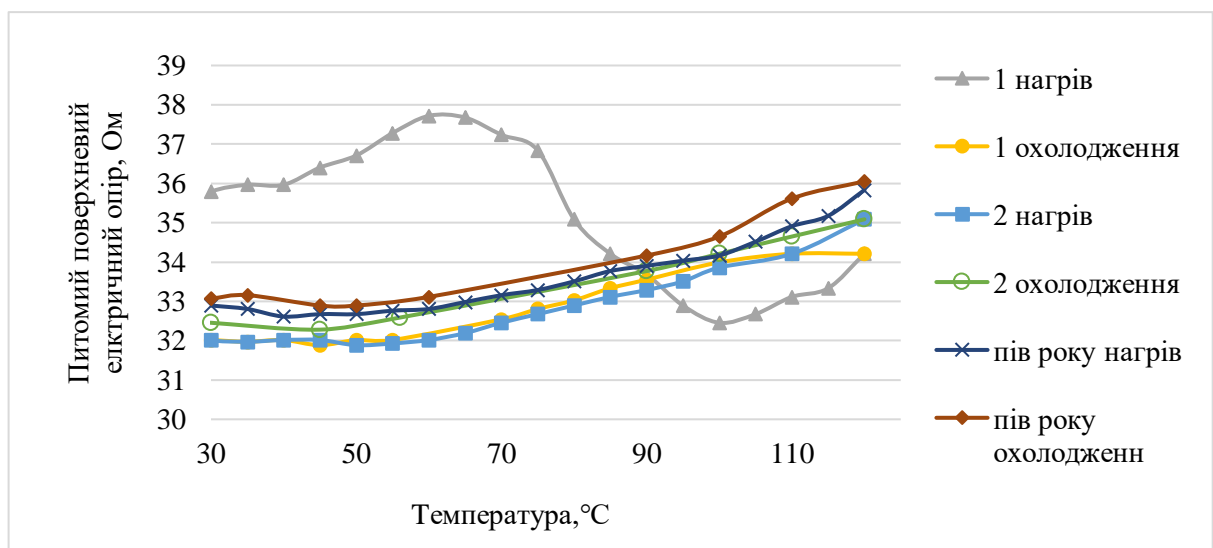


Рисунок 4.6 - Залежність питомого поверхневого опору від температури КЕП на основі ПВБ з підвищеним вмістом до 40 мас. % (композиція №6).

Для композиції №6 отримали ТКО $0.00107 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ при вмісті полімерної матриці ПВБ - 40%.

На графіку ми бачимо дві основні лінії, що відповідають за нагрівання (сіра та синя лінії) і дві лінії для охолодження (жовта та зелена лінії), які представляють зміну питомого опору з температурою для зразків з вмістом ПВБ 40%. Видно, що вміст ПВБ має вплив на температурну стабільність покриттів. Опір при нагріванні змінюється помірно.

Лінії охолодження показують менші коливання опору, що свідчить про відновлення первісного стану електропровідності після зниження температури, і це також може вказувати на високу термічну стабільність композитного матеріалу.

Інша пара ліній (темно-сіра та оранжева) представляють зразки, які були піддані температурному циклу протягом одного року, показують довгострокову стабільність покриттів. Вони показують подібну тенденцію до змін у опорі з температурою, хоча і з деяким збільшенням опору, що може свідчити про старіння матеріалу або про зміни в мікроструктурі внаслідок довгострокової експлуатації.

Сіра лінія на графіку, яка відображає залежність питомого поверхневого опору від температури, заслуговує особливої уваги. Ця лінія демонструє поведінку питомого опору зразка з полімерною матрицею ПВБ 40% під час першого нагріву. Спостерігається, що опір матеріалу спочатку підвищується з ростом температури, досягаючи максимуму приблизно в середині температурного діапазону, а потім знову знижується. Така нелінійна поведінка може бути зумовлена кількома факторами.

З підвищенням температури полімерна матриця може ймовірно зазнавати структурних перебудов, включаючи деформації розширення та стиснення, що змінює відстань між провідними частинками і може тимчасово збільшувати опір. Можливо, у КЕП залишилися леткі компоненти, які

поступово вивільняються при підвищенні температури, що спричиняє зміну електропровідних властивостей КЕП.

На основі отриманих даних, КЕП з вмістом ПВБ 40% показує підвищення опору зі збільшенням температури. Це може бути перевагою в нагрівальних елементах, де потрібно уникати перегрівання системи, за рахунок саморегуляції своєї температури.

На основі отриманих даних про властивості різних зразків КЕП, було виявлено, що композиція №1, на основі ПВБ з позитивним ТКО, підходить для створення нагрівальних елементів.

Інші композиції, такі як №2, №3, №4 і №5, хоч і показали зменшення опору з підвищенням температури (негативний ТКО), не були вибрані для подальшого дослідження через меншу стабільність та вищі ризики самонагрівання. Це може бути небажано в системах, де вимагається висока надійність і безпека використання.

Композиція №6 також виявився потенційно відповідною, його показники ТКО вказують на підвищення опору при збільшенні температури, що може бути корисним для нагрівальних елементів з саморегуляцією температури. Однак, з огляду на подібність показників з композицією №1 та додаткові переваги останньої у вигляді більш стабільного поведінки при різних умовах, композиція №1 залишається найкращим вибором для подальшого дослідження.

4.2 Дослідження вольт-амперних характеристик композитних електропровідних покриттів

Для дослідження ВАХ КЕП використовували композит з рецептурою: графіт С0 - 60%, сажа ХС72 - 10%, ПВБ - 29%, силан Dynasylan АМЕО - 1%. Виготовляли зразки КЕП методом нанесення покриття ракульним

аплікатором з анілоксовим валом. Розмір зразків складав: довжина - 35 мм, ширина - 15 мм, товщина покриття - 50 мкм.

Дослідження проводили при температурі 20°C. ВАХ для КЕП зразок №1, який був створений за допомогою ультразвукового диспергування зображено на рис. 4.7. Також залежність потужності від напруги рис. 4.8. Графік залежності питомої поверхневої потужності від напруги рис. 4.9, та Графік залежності питомої об'ємної потужності від напруги рис. 4.10.

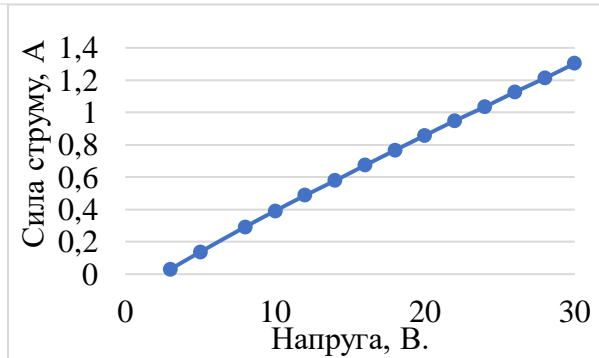


Рисунок 4.7 – Залежність сили струму від прикладеної напруги, зразок №1.

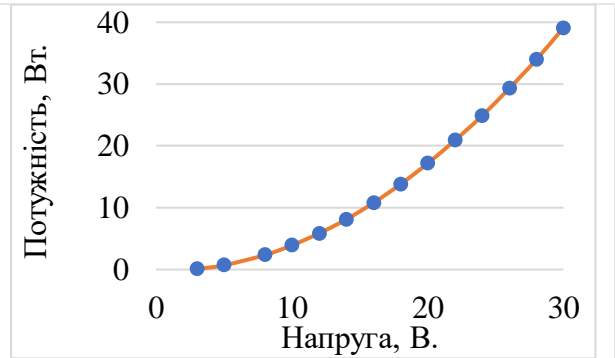


Рисунок 4.8 - Залежність потужності від напруги, зразок №1.

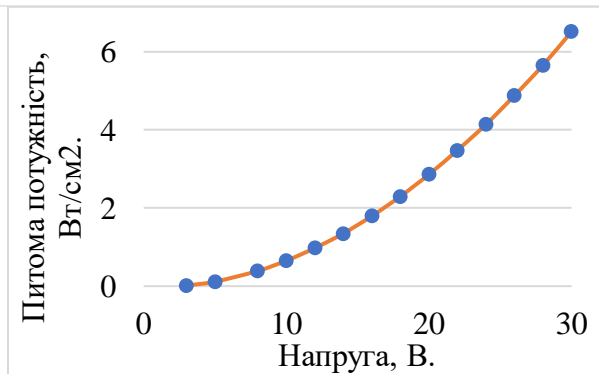


Рисунок 4.9 - Питома поверхнева потужність (Вт/см²) залежно від напруги (В), зразок №1.

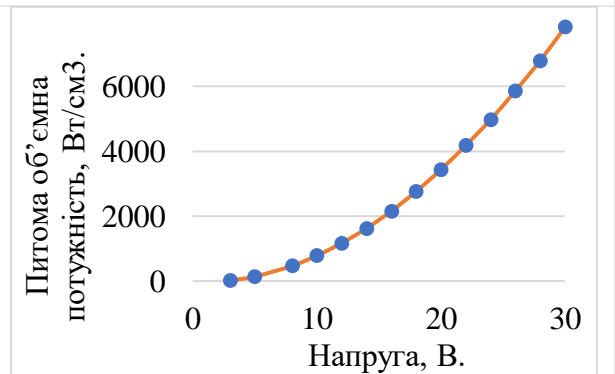


Рисунок 4.10 - Питома об'ємна потужність (Вт/см³) залежно від напруги (В), зразок №1.

Графік ВАХ зразок №1. На графіку ВАХ для КЕП при 12 вольтах фіксується струм 0.49 ампер, а при 24 вольтах — 1.04 ампер. Це вказує на збільшення електричного навантаження, що є характерним для більш високої напруги та свідчить про вищу ефективність нагріву при збільшенні напруги.

Графік потужності зразок №1. При 12 вольтах потужність КЕП становить 5.84 вати, тоді як при 24 вольтах це значення збільшується до 24.84 ватів. Цей графік показує, як значно зростає потужність із подвоєнням напруги, що вказує на необхідність адекватного тепловідведення для запобігання перегріву.

Графік питомої поверхневої потужності на площу зразок №1. Графік питомої поверхневої потужності при 12 вольтах складає 0.97 Вт/см^2 , а при 24 вольтах вона збільшується до 4.14 Вт/см^2 . Цей графік важливий для оцінки теплового навантаження на поверхню нагрівального елемента і потенційної необхідності посиленого охолодження.

Графік питомої потужності на об'єм зразок №1. При 12 вольтах питомої потужності на об'єм становить 1168.80 Вт/м^3 , а при 24 вольтах — 4968 Вт/м^3 . Збільшення щільності потужності вказує на зростаючі вимоги до внутрішнього тепловідведення та стабільності матеріалів.

Для наступного дослідження ВАХ для КЕП зразок №2 використали ступкове диспергування та тривалковий млин. ВАХ представлена на рис. 4.11. Також залежність потужності від напруги рис. 4.12. Графік залежності питомої поверхневої потужності від напруги рис. 4.13, та Графік залежності питомої об'ємної потужності від напруги рис. 4.14.

На основі даних, розглянемо чотири основні залежності нагрівального елемента при напругах 12 та 24 вольти: вольт-амперну характеристику, потужність, щільність потужності на одиницю площі та щільність потужності на одиницю об'єму.

Графік вольт-амперної характеристики зразок №2. На графіку ВАХ при 12 вольтах фіксуємо силу струму 0.49 ампер, тоді як при 24 вольтах — 1.04

ампери. Це підтверджує збільшення сили струму при збільшенні напруги, що є очікуваним для омичних нагрівальних елементів, та свідчить про лінійну залежність між напругою та струмом.

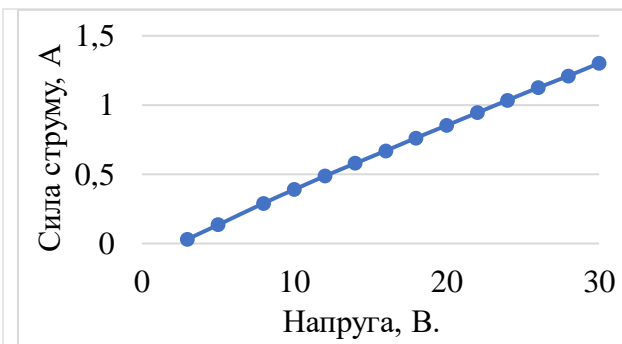


Рисунок 4.11 – Залежність сили струму від прикладеної напруги, зразок №2.

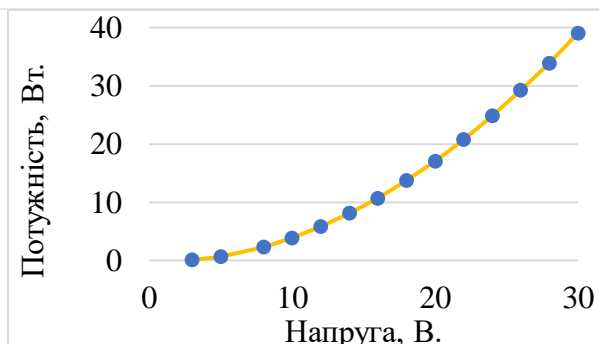


Рисунок 4.12 - Залежність потужності від напруги, зразок №2.

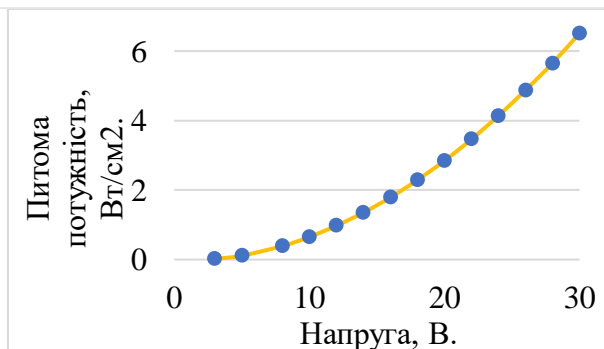


Рисунок 4.13 - Питома поверхнева потужність (Вт/см²) залежно від напруги (В), зразок №2.

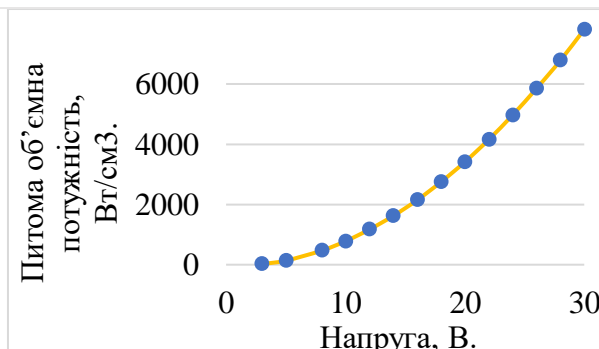


Рисунок 4.14 - Питома об'ємна потужність (Вт/см³) залежно від напруги (В), зразок №2.

Графік потужності зразок №2. Потужність при 12 вольтах становить 5.84 вати, що є відносно помірним тепловиділенням для нагрівального елемента. При 24 вольтах потужність зростає до 24.84 ватів, що свідчить про істотне збільшення тепловиділення і, відповідно, нагріву.

Графік питомої потужності на площу зразок №2. При 12 вольтах маємо значення питомої потужності 0.97 Вт/см², яка зростає до 4.14 Вт/см² при 24

вольтах. Це зростання показує на більш високий рівень тепловиділення на одиницю площі, що може вимагати посилення тепловідведення при використанні елемента на вищій напрузі.

Графік питомої потужності на об'єм зразок №2. При 12 вольтах питомої потужності на об'єм становить 1168.80 Вт/м³. При 24 вольтах цей показник збільшується до 4968 Вт/м³. Значне зростання питомої потужності на об'єм свідчить про збільшений ризик перегріву матеріалу нагрівального елемента при використанні вищої напруги.

Порівнюючи дослідження №1 та №2, можна помітити узгодженість в результатах. Обидва аналізи підтверджують, що зі збільшенням напруги від 12 до 24 вольт значення струму, потужності та питомої потужності як на площу, так і на об'єм зростають. Це свідчить про більшу ефективність та інтенсивність нагріву при більшій напрузі. У обох випадках підкреслюється важливість ефективного тепловідведення для запобігання перегріву при вищих напругах.

У наступному дослідженні ВАХ використовували дисперсер для створення КЕП. ВАХ крива представлена на рис. 4.15. Також Залежність потужності від напруги рис. 4.16. Графік залежності питомої поверхневої потужності від напруги рис. 4.17, та Графік залежності питомої об'ємної потужності від напруги рис. 4.18.

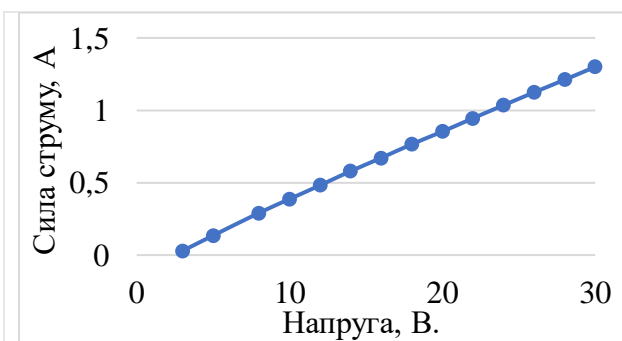


Рисунок 4.15 – Залежність сили струму від прикладеної напруги, зразок №3.

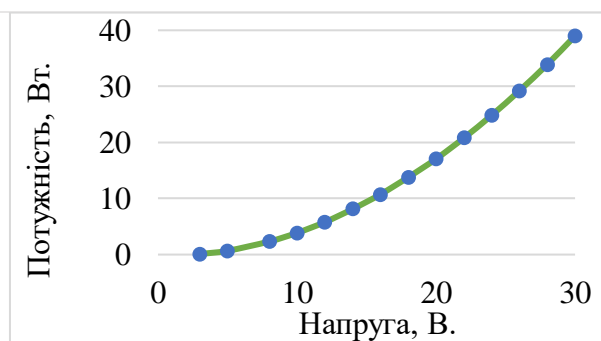
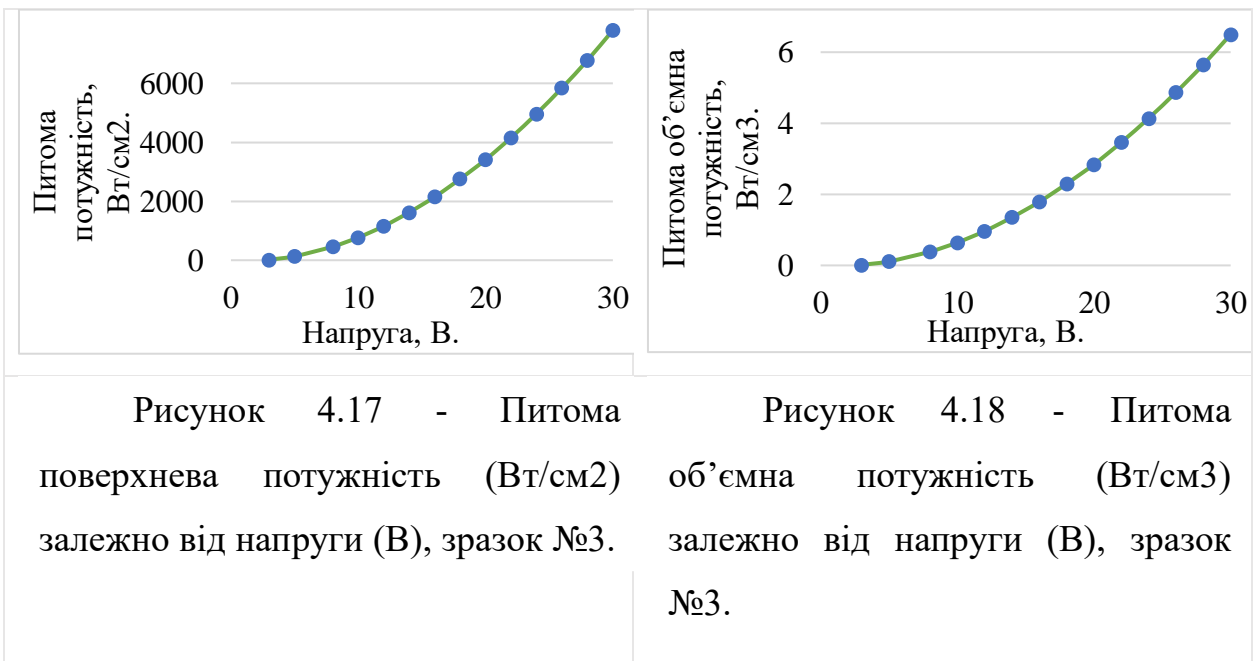


Рисунок 4.16 - Залежність потужності від напруги, зразок №3.



Графік вольт-амперної характеристики зразок №3. При 12 вольтах маємо силу струму 0.48 ампера, що збільшується до 1.03 амперів при 24 вольтах. Це лінійне зростання вказує на стабільний електричний опір елемента та очікуване збільшення ефективності нагріву з підвищенням напруги.

Графік потужності зразок №3. Розрахункова потужність при 12 вольтах становить 5.78 вати, що свідчить про помірне тепловиділення. При 24 вольтах потужність значно збільшується до 24.84 ватів, що вказує на більш інтенсивний нагрів.

Графік питомої потужності на об'єм зразок №3. Питомої потужності на одиницю площі зростає з 0.96 Вт/см² при 12 вольтах до 4.14 Вт/см² при 24 вольтах, підкреслюючи збільшене тепловиділення на поверхні елемента, що вимагає ефективного тепловідведення.

Графік питомої потужності на об'єм зразок №3. Питомої потужності на об'єм збільшується з 1156.80 Вт/м³ при 12 вольтах до 4968 Вт/м³ при 24 вольтах, вказуючи на вищу теплову ефективність та можливість перегріву внутрішньої структури елемента при більшій напрузі.

Зразки, створені за допомогою ультразвукового диспергування №1, ступкового млина №2 та використання диспергатора №3, показують майже

ідентичні результати при вольт-амперних характеристичних (ВАХ) вимірюваннях. Це вказує на те, що ці методи диспергування майже однаково впливають на електричні властивості створених зразків, забезпечуючи однакову якість та повторюваність електропровідних параметрів нагрівальних елементів.

Наступне дослідження ВАХ включає використання тривалкового млина для створення КЕП. ВАХ крива представлена рис.4.19. Залежність потужності від напруги рис.4.20. Графік залежності питомої поверхневої потужності від напруги рис. 4.21, та Графік залежності питомої об'ємної потужності від напруги рис. 4.22.

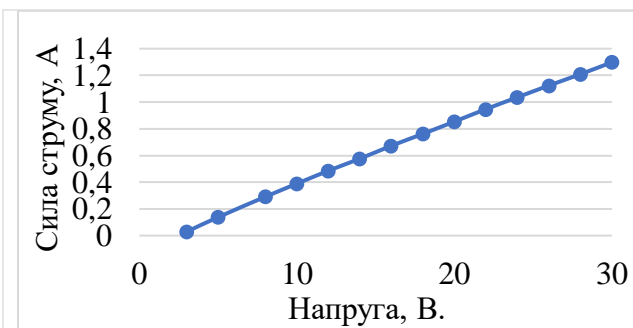


Рисунок 4.19 - Залежність сили струму від прикладеної напруги, зразок №4.

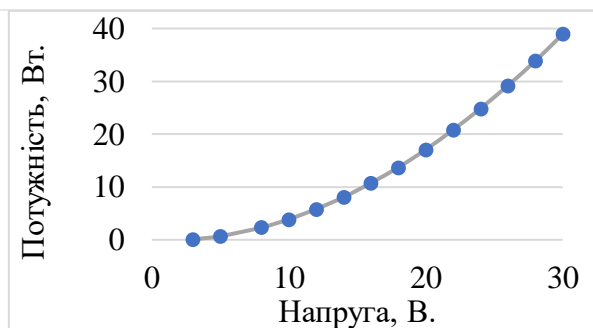


Рисунок 4.20 - Залежність потужності від напруги, зразок №4.

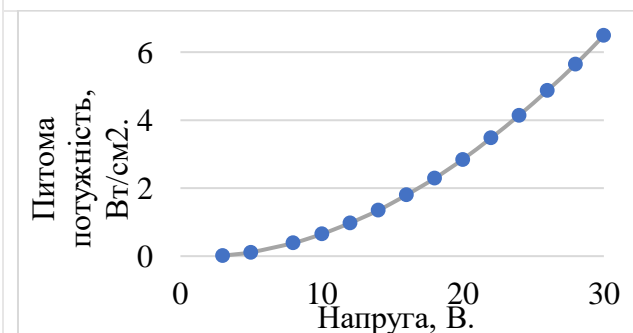


Рисунок 4.21 - Питома поверхнева потужність (Вт/см²) залежно від напруги (В), зразок №4.

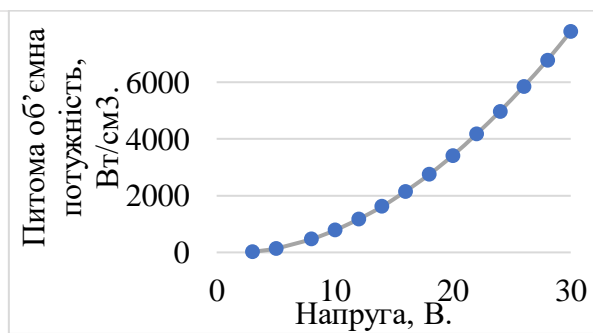


Рисунок 4.22 - Питома об'ємна потужність (Вт/см³) залежно від напруги (В), зразок №4.

Графік вольт-амперної характеристики (ВАХ) зразок №4. При 12 вольтах фіксується струм 0.49 ампера, а при 24 вольтах — 1.04 ампера. Це відображає очікуване збільшення сили струму зі зростанням напруги.

Графік потужності зразок №4. Потужність при 12 вольтах складає 5.83 вати, що вказує на помірний рівень нагріву елемента. При збільшенні напруги до 24 вольтів потужність підвищується до 24.86 ватів, що підтверджує значно більшу теплову віддачу.

Графік питомої потужності на об'єм зразок №4. За даними, питомої потужності на одиницю площі при 12 вольтах становить 0.97 Вт/см^2 , зростаючи до 4.14 Вт/см^2 при 24 вольтах. Це вказує на значне збільшення тепловиділення, що може потребувати посиленого тепловідведення при високих напругах.

Графік питомої потужності на об'єм зразок №4. При 12 вольтах питомої потужності на об'єм дорівнює 1166.40 Вт/м^3 , а при 24 вольтах — 4972.80 Вт/м^3 . Це зростання свідчить про збільшений ризик перегріву внутрішніх частин елемента при вищій напрузі.

Порівнюючи зразок №3 та зразок №4 для нагрівальних елементів при напругах 12 та 24 вольт, спостерігаються відмінності у вимірах, що можуть бути викликані нижчим опором зразка №4.

При 12 вольтах. Сила струму в новому дослідженні трохи нижча (0.48 А проти 0.49 А). Потужність також незначно менша (5.83 Вт проти 5.84 Вт).

Питома потужність на одиницю площі та об'ємна в новому дослідженні трохи нижчі (0.97 Вт/см^2 та 1166.40 Вт/м^3 проти 0.97 Вт/см^2 та 1168.80 Вт/м^3 відповідно).

При 24 вольтах. Сила струму в новому дослідженні дуже близька (1.03 А порівняно з 1.04 А). Потужність показує майже ідентичне значення (24.86 Вт порівняно з 24.84 Вт). Питома потужність на площу та об'єм злегка збільшилася (4.14 Вт/см^2 та 4972.80 Вт/м^3 проти 4.14 Вт/см^2 та 4968 Вт/м^3).

У наступному дослідженні ВАХ, створенні КЕП за допомогою дисперсера з товщинами 50, 75, 100. ВАХ крива представлена на рис. 4.23. Залежність потужності від напруги рис. 4.24. Графік залежності питомої поверхневої потужності від напруги рис. 4.25, та Графік залежності питомої об'ємної потужності від напруги рис. 4.26.

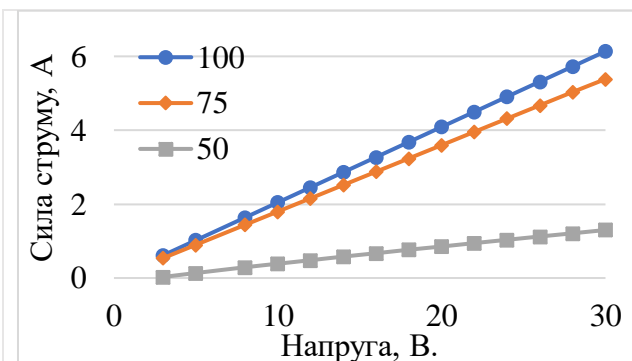


Рисунок 4.23 - Залежність сили струму від прикладеної напруги, зразок №5 - №7.

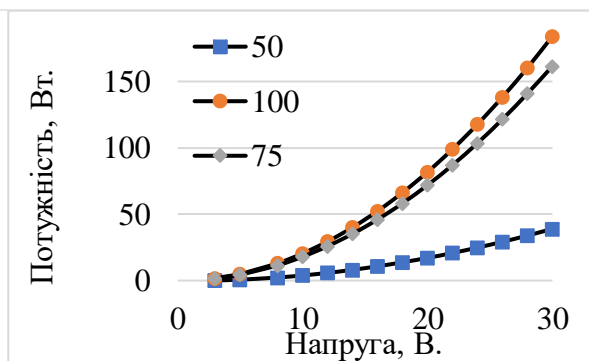


Рисунок 4.24 - Залежність потужності від напруги, зразок №5 - №7.

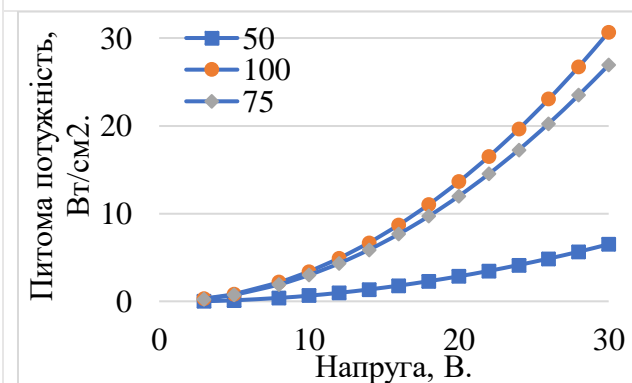


Рисунок 4.25 - Питомі поверхневі потужності (Вт/см²) залежно від напруги (В), зразок №5 - №7.

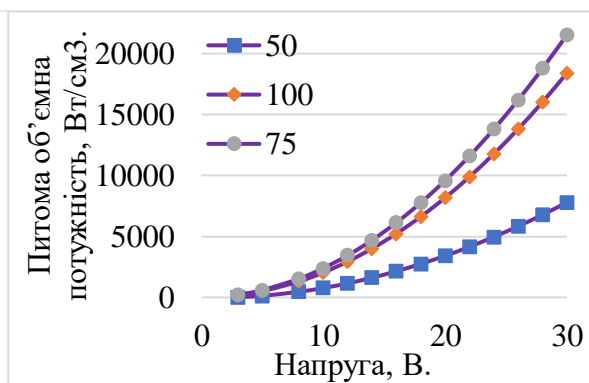


Рисунок 4.26 - Питомі об'ємні потужності (Вт/см³) залежно від напруги (В), зразок №5 - №7.

При товщині 50 мікрон. При 12 вольтах: Сила струму становить 0.48 А, потужність - 5.78 Вт, щільність потужності на площу - 0.964 Вт/см², на об'єм - 1156.80 Вт/м³. При 24 вольтах. Сила струму збільшується до 1.04 А, потужність - 24.84 Вт, щільність потужності на площу - 4.14 Вт/см², на об'єм - 4968 Вт/м³.

При товщині 75 мікрон. При 12 вольтах: Сила струму становить 0.54 А, потужність - 6.47 Вт, питома потужність на площу - 1.35 Вт/см², на об'єм - 1624 Вт/м³. При 24 вольтах: Сила струму збільшується до 1.04 А, потужність - 24.86 Вт, питома потужність на площу - 4.14 Вт/см², на об'єм - 4972.80 Вт/м³.

При товщині 100 мікрон. При 12 вольтах: Сила струму становить 0.576 А, потужність - 6.91 Вт, питома потужність на площу - 1.344 Вт/см², на об'єм - 2147.20 Вт/м³. При 24 вольтах: Сила струму збільшується до 1.12 А, потужність - 26.98 Вт, питома потужність на площу - 4.87 Вт/см², на об'єм - 5844.80 Вт/м³.

Зі збільшенням товщини нагрівального елемента від 50 до 100 мікрон спостерігається зростання сили струму, що вказує на зменшення опору зі збільшенням товщини. При 24 вольтах ця тенденція є більш вираженою. Таким чином, товщина матеріалу є важливим параметром, що впливає на електричні властивості нагрівальних елементів.

Електричні характеристики нагрівальних елементів, такі як сила струму, потужність та питома потужність на одиницю площі та об'єму, лінійно збільшуються з ростом напруги від 12 до 24 В. Це збільшення відповідає очікуванім фізичним закономірностям для омичних матеріалів. Із збільшенням товщини нагрівальних елементів від 50 до 100 мікрон спостерігається також зростання сили струму та потужності, що свідчить про зменшення електричного опору і підвищення тепловіддачі для більших товщин.

На основі аналізу залежностей електричних характеристик від товщини нагрівальних елементів і впливу напруги на їхні властивості, можна зробити важливий висновок щодо виробництва гнучких нагрівальних елементів. Для оптимізації їхньої ефективності та безпеки рекомендується:

Зразки з товщиною 50 - 75 мікрон показали нижчу питому потужність і силу струму порівняно з 100 мікрон. Це може бути перевагою для застосувань, де необхідно зберегти гнучкість і легкість елементів без значного підвищення потужності.

Збільшення напруги з 12 до 24 вольт значно підвищує всі електричні параметри, що вказує на необхідність ретельного вибору режиму живлення для запобігання перегріву і забезпечення тривалої роботи.

4.3 Технологія створення нагрівальних елементів з електропровідних полімерних композитних покриттів

У роботі було створено та досліджено характеристики різних типів нагрівачів: жорстких та гнучких. А також досліджено вплив технології створення на експлуатаційні характеристики нагрівачів.

Загальна схема конструкції нагрівального елемента на основі КЕП, запропонована у роботі, зображена на малюнку (рис. 4.27).



Рисунок 4.27 – Загальне схематичне зображення конструкції нагрівального елемента на основі КЕП, де: 1 – контактна площа; 2 - шар КЕП; 3-субстрат.

Нагрівальний елемент запропонований у роботі складається із субстрату, контактної поверхні та КЕП.

Контактна площа - це частина нагрівального елемента, яка забезпечує електричний контакт з джерелом живлення. Вона зазвичай виготовляється з міді завдяки її високій електропровідності та гарній корозійній стійкості.

Субстрат - це підкладка або основа, на яку наноситься нагрівальний шар або електропровідне покриття. Субстрат може бути виготовлений з різних матеріалів, включаючи метали, кераміку, скло або пластик, в залежності від вимог до нагрівального елемента.

Гнучкий субстрат, такі як полімерна плівка ПЕТ ідеально підходить для адаптивних технологій, дозволяючи інтеграцію нагрівальних елементів в

різноманітні поверхні. Жорсткий субстрат, ДСП забезпечує високу стабільність та міцність.

Наступний важливий етап для створення нагрівального елемента є створення контактної площини. Створення контакту є вкрай важливим етапом у процесі розробки нагрівальних елементів. Цей етап включає дизайн і імплементацію площини, яка буде підключена до електричної мережі, і відіграє ключову роль у забезпеченні ефективної роботи та безпеки нагрівального елемента. Оптимізація контактної області впливає на розподіл тепла, електричну провідність, а також загальну ефективність і довговічність нагрівального елемента.

У процесі розробки нагрівальних елементів ми розглядаємо різні підходи до створення контактів. Ці методи варіюються залежно від, конструкції нагрівального елемента, та специфічних вимог застосування.

Перший метод створення контакту для нагрівального елемента, базується на використанні мідної шини, яка наклеюється на краю субстрату перед нанесенням КЕП. Цей підхід включає три варіанти виконання №1, №2, №3.

Варіант виконання №1 без додаткового субстрату зображено на малюнку рис. 4.28.

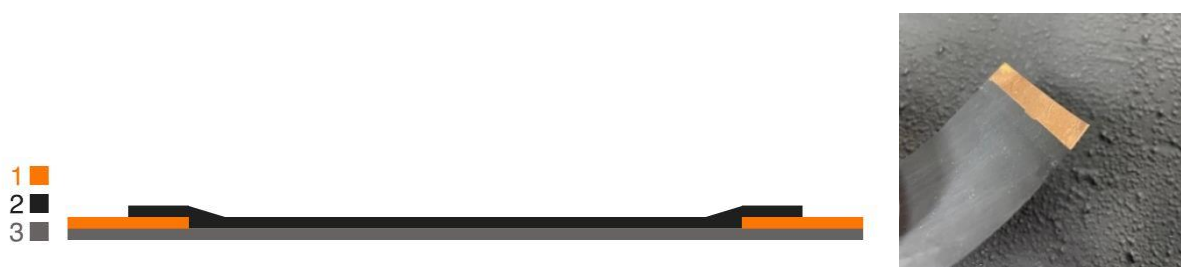


Рисунок 4.28 – Схематичне зображення конструкції нагрівального елемента без додаткового субстрату (варіант виконання № 1): 1 - мідна шина; 2-шар КЕП; 3-субстрат.

У цьому випадку мідна стрічка наклеюється безпосередньо на краї субстрату, а потім КЕП наноситься поверх субстрату та частково на мідну

стрічку. Це забезпечує контакт КЕП з мідною стрічкою, створюючи ефективний електричний з'єднання. Однак, у цьому методі може виникнути нерівномірність контакту та товщини КЕП на межі між мідною стрічкою та субстратом через різницю в їх товщинах.

Варіант виконання з додатковим субстратом №2 рис. 4.29. В цьому варіанті, між мідними стрічками вклеюється додатковий шар субстрату, товщина якого рівна товщині мідної стрічки. Це робиться для усунення різниці в товщині між мідною стрічкою та основним субстратом, що дозволяє створити більш рівномірний шар КЕП на всій поверхні, включаючи місця з'єднання з мідною стрічкою. Такий підхід може підвищити якість контакту та забезпечити більш однорідний нагрів.



Рисунок 4.29 – Схематичне зображення конструкції нагрівального елемента з додатковим субстратом (варіант виконання № 2): 1-Мідна шина; 2-Шар КЕП; 3-Субстрат; 4-Ламінація; 5-Проміжний субстрат.

На рис. 4.30 представлено процес ламінації мідної шини на КЕП №3. Ламінація забезпечує надійний контакт мідної шини до поверхні субстрату, що сприяє легкому інтегруванню її у конструкцію нагрівального елемента. Цей метод дозволяє досягти високоякісного контакту між мідною шиною та КЕП, що є важливим для забезпечення рівномірного розподілу тепла по всій поверхні нагрівача.



Рисунок 4.30 – Схематичне зображення конструкції нагрівального елемента методом ламінації мідної шини на КЕП (варіант виконання № 3): 1 - мідна шина; 2 - шар КЕП; 3 - субстрат; 4 - ламінація.

Другий метод створення контакту (варіант виконання №4) для нагрівального елемента, базується на використанні вуглецевого волокна як провідного з'єднання для створення контактів на нагрівальних елементах, що базуються на жорстких субстратах рис. 4.31.



Рисунок 4.31. – Схематичне зображення конструкції жорсткого нагрівального елемента з використанням вуглецевого волокна (варіант виконання №4): 1 - вуглецеве волокно; 2 - шар КЕП; 3 - жорсткий субстрат; 4 - скоба.

Спочатку, композитне електропровідне покриття КЕП наноситься на обраний субстрат. Це може бути здійснено методом розпилення. Після висихання КЕП, вуглецеве волокно накладається на його поверхню на краях нагрівального елемента. Цей матеріал вибирається через його високу електропровідність та здатність до рівномірного контакту.

Далі, для забезпечення міцного електричного контакту та механічного закріплення, вуглецеве волокно притискається кріпильним елементом скобою. Така конструкція дозволяє не тільки ефективно передавати електричний струм, але й нівелює нерівномірність верхнього шару КЕП, забезпечуючи більш однорідний та ефективний нагрів. Цей метод є особливо вдалим для застосування у жорстких нагрівальних елементах, де важливі висока механічна міцність та стабільність контактної зони.

Третій метод створення контактів (варіант виконання №5) для нагрівальних елементів за допомогою гальванічного нанесення міді включає точне підключення електродів та використання електрохімічного процесу для формування мідного шару на композитному електропровідному покритті КЕП рис. 4.32.

У цьому процесі, електрод підключається до КЕП лише з одного боку, тоді як інший край КЕП занурюється в розчин мідного купоросу. Під час електролізу негативний електрод (-) підключається до КЕП, тоді як позитивний електрод (+) – до мідної пластини, яка також занурена в розчин.

1 ■
2 ■
3 ■

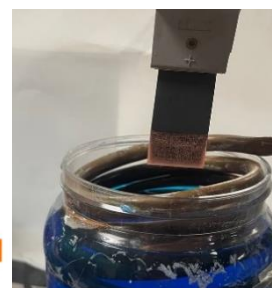


Рисунок 4.32 – Схематичне зображення конструкції жорсткого нагрівального елемента з мідними контактами нанесеними гальванічним методом (варіант виконання №5): 1 – мідні контакти нанесені гальванічним методом; 2 - шар КЕП; 3 - субстрат.

Коли до системи прикладається електричний струм, відбувається процес електролізу, де мідь з розчину мідного купоросу електрохімічно осідає на частину КЕП, що занурена в розчин. Це відбувається через рух мідних іонів

від позитивного електроду до негативного, внаслідок чого мідь накопичується на поверхні КЕП, утворюючи провідний мідний шар.

Такий метод електрохімічного нанесення міді ефективний для створення міцних та провідних контактних зон на КЕП, забезпечуючи високу якість електричного з'єднання. Цей підхід дозволяє точно контролювати товщину мідного шару та забезпечує високу адгезію міді до КЕП

Визначення контактного опору має важливе значення, оскільки він може суттєво впливати на загальну ефективність нагрівальних елементів, зокрема на їхню здатність ефективно передавати електричний струм до КЕП для генерації тепла. Тому важливо зосередитись на аналізі контактного опору між мідними контактами і композитним електропровідним покриттям.

Контактний опір впливає на кілька ключових аспектів нагрівального елемента. Високий контактний опір може призвести до зменшення струму, що проходить через нагрівальний елемент, що може знизити ефективність нагріву.

Великий контактний опір може спричинити збільшення теплового навантаження на контактні точки, що може призвести до прискореного зносу та зниження надійності нагрівального елемента. Значний контактний опір може призвести до більшого споживання енергії для досягнення потрібної температури нагрівання, збільшуючи енергетичні витрати.

Вимірювання контактного опору може бути здійснене різними методами, залежно від конкретних вимог до точності та природи контакту. Одним з методів, який використали у роботі, є метод порівняльного вимірювання, де контактний опір визначається як різниця між загальним опором системи (зразок з контактами) та відомим опором самого зразка.

Вимірювання загального опору системи: Спочатку міряється загальний опір системи, який включає опір самого зразка та контактний опір на його кінцях. Це вимірювання може бути виконане за допомогою стандартного двох електродного методу, де струм подається через зразок, а напруга вимірюється на тих самих контактах.

Вимірювання опору зразка (формула 4.1) відбувається без врахування контактного опору. Вимірювання проводили методом Кельвіна, де окремі електроди використовуються для подачі струму та вимірювання напруги, мінімізуючи вплив контактного опору.

$$R_{\text{зразка}} = \rho \cdot \frac{W}{L} \quad (4.1)$$

де ρ – питомий поверхневий опір; L – довжина зразка; W – ширина зразка.

Розрахунок контактного опору (формула 4.2.): Контактний опір розраховується як різниця між опором системи або загальним опором, та опором зразка, отриманим у другому кроці (формула 4.1) для розрахунку контактного опору виглядатиме так.

$$R_{\text{контактний}} = R_{\text{загальний}} - R_{\text{зразка}} \quad (4.2)$$

Урахування контактів на обох кінцях зразка: Якщо контактні опори присутні на обох кінцях зразка, потрібно буде поділити отриманий контактний опір на два, припускаючи, що обидва контакти мають однаковий опір.

Дослідження контактного опору було проведено для двох систем КЕП. Для композиту, з наступною рецептурою: сажа ХС72 – 10%, графіт С0 - 60%, Dynasylan АМЕО - 1%, ПВБ - 29%. Розміри зразка КЕП склали: товщина - 80 мкм, ширина – 80мм, довжина – 43мм. При вимірюванні двохелектродним методом, мідні контакти, розташовані на кінцях зразка з нанесеним КЕП показали опір 58,5 Ом, тоді як вимірювання чотирьох електродним методом питомий поверхневий опір зразка склав 28,88 Ом, отримавши таким чином контактний опір 29,62 Ом.

Друга система КЕП мала наступну рецептуру: сажі ХС72 - 20%, графіту С0- 58%, Dynasylan АМЕО - 2% та ПВБ - 20%. Розміри зразка склали: товщина - 300 мкм. ширина – 80 мм, довжина – 50мм. При вимірюванні двохелектродним методом, мідні контакти, розташовані на кінцях зразка з нанесеним КЕП показали опір 13,5 Ом, тоді як вимірювання чотирьох електродним методом питомий поверхневий опір зразка склав 5,60 Ом, отримавши таким чином контактний опір 7,9 Ом.

Ці результати вимірювань дозволили оцінити вплив різного складу КЕП та товщини зразків на електропровідні властивості та контактну взаємодію між КЕП і мідними контактами, що є важливим для подальшого вдосконалення характеристик нагрівальних елементів та електропровідних покриттів. Виявлення значного контактного опору між КЕП та мідними контактами в обох системах, з урахуванням різниці в товщині зразків, підкреслює необхідність ретельного вибору матеріалів та оптимізації процесів виготовлення для зниження контактного опору та покращення загальних електропровідних характеристик КЕП.

Наступним важливим етапом проектування нагрівальних елементів, є створення захисного ізоляційного шару для КЕП. Ізоляція КЕП може бути здійснена шляхом ламінування, лакування. Ламінування передбачає покриття захисним шаром за допомогою полімерних матеріалів або спеціальних плівок, забезпечуючи захист від механічних ушкоджень, вологи та інших зовнішніх впливів. Лакування включає нанесення тонкого шару ізоляційного лаку, особливо корисного у випадках, де КЕП має нерівномірну поверхню або потребує збереження гнучкості. З іншого боку, в деяких умовах може бути прийнято рішення не ізолювати КЕП, зокрема, коли ризик короткого замикання мінімальний або нагрівальний елемент використовується в середовищах, що не вимагають додаткового захисту. Вибір між цими варіантами залежить від конкретних умов застосування нагрівального елемента та загальних вимог до безпеки та ефективності.

Щоб оцінити кінцеві характеристики нагрівального елемента визначали його питому потужність. Для дослідження питомої потужності в залежності від товщини нагрівального елемента зібрані дослідну установку (рис. 4.33).

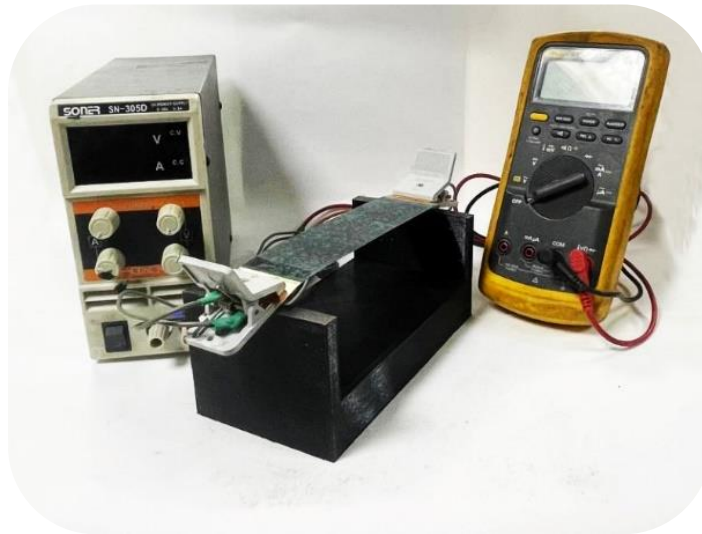


Рисунок 4.33 – Дослідна установка для дослідження питомої потужності нагрівального елемента в залежності від його товщини.

Визначення питомої потужності важливе для розуміння того, як товщина КЕП впливає на його здатність проводити електричний струм та генерувати тепло при розмірі нагрівального елемента 40мм на 190мм. Отримані данні зображені на рис. 4.34.

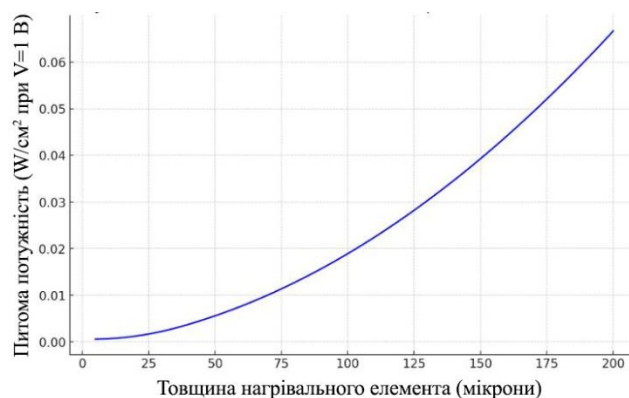


Рисунок 4.34 – Залежність питомої потужності від товщини нагрівального елемента.

Як видно, зі збільшенням товщини нагрівального елемента питома потужність зростає, що вказує на зменшення електричного опору. Графік ілюструє, як змінюється здатність нагрівального елемента генерувати тепло зі зміною його товщини.

Розглянемо окремо гнучкий та жорсткий нагрівальний елемент розміром 40мм на 190 мм при навантаженні 10, 20, 30V (табл. 4.2.)

Таблиця 4.2

Залежність питомої потужності нагрівального елемента від його товщини

Тип нагрівача	Товщина, мкм	Навантаження, В	Питома потужність, Вт/см ²
Гнучкий	40	10	0.01
Гнучкий	40	20	0.03
Гнучкий	40	30	0.07
Жорсткий	300	10	0.09
Жорсткий	300	20	0.35
Жорсткий	300	30	0.79

Аналізуючи роботу нагрівального елемента, створеного з КЕП, основним фактором є розуміння того, як метод створення впливає на його вихідні характеристики, зокрема площу, потужність та температуру, які залежать від часу подачі струму. Вибір методу виготовлення, будь то розпилення, використання валиків чи ламінування, визначає однорідність КЕП та його здатність рівномірно розподіляти тепло. Площа нагрівального елемента впливає на розподіл тепла, і більша площа забезпечує більш рівномірне розподілення, тоді як температура, досягнута елементом, залежить від його потужності та фізичних характеристик, таких як теплопровідність та температурна залежність.

На основі попередніх досліджень ми обрали методи для отримання нагрівальних елементів, які в себе включають використання ПЕТ плівки та ДСП в якості субстрату та модельної рецептури КЕП: графіту С0 - 60%, сажі

ХС72 - 10%, силан Dynasylan АМЕО - 1%, та ПВБ - 29%. Використовували два методи нанесення КЕП для виготовлення нагрівачів: роликним аплікатором з анілоксовим валом та метод розпилення. Створення контактної площини проводили наступними методами: метод без проміжного субстрату №1, метод з проміжним субстратом №2, метод ламінації мідної шини №3, метод створення контакту з використанням вуглецевого волокна №4.

Перший метод виготовлення нагрівачів включав в себе використання ПЕТ плівки, проміжного ПЕТ субстрату, та модельної рецептури КЕП. Як метод нанесення обрали роликний аплікатор з анілоксовим валом та в якості створення контактної площини обрали метод з проміжним субстратом №2 для рівномірного нанесення КЕП з використання ламінації (рис. 4.35).

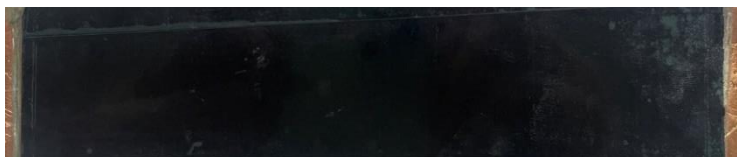


Рисунок 4.35 – Фото гнучкого нагрівального елемента з додатковим субстратом з ламінуванням.

Створення гнучкого нагрівального елемента розпочинається з підготовки субстрату з ПЕТ плівки, на який з обох боків кріпляться мідні шини, що служать контактною площиною для електричного з'єднання. Між цими мідними шинами розміщується додатковий субстрат ідентичної товщини, який забезпечує рівну основу для нанесення шару КЕП. Роликний аплікатор дозволяє рівномірно покрити поверхню субстрату КЕП, після чого конструкція залишається сушитись в умовах кімнатної температури близько 25°C на добу. Завершальним етапом є ламінування висушеного зразка захисною ПЕТ плівкою, що гарантує його міцність і захист. Характеристики отриманого нагрівального елемента довжиною 130 мм та шириною 40 мм наведені в табл. 4.3.

Властивості гнучкого нагрівального елемента

Товщина КЕП, мкм	25		50		100	
Напруга, В	12	24	12	24	12	24
Питома потужність P_{s1} площина, Вт/см ²	0.01	0.01	0.01	0.04	0.03	0.11
Питома потужність P_{s2} переріз, Вт/см ³	24	96	2.11	8.42	2.60	10.3
Контактний опір, Ом	437		66		34,15	
Опір між контактами, Ом	600		180		73	

Наступний метод виготовлення нагрівачів включав в себе використання ПЕТ плівки та модельної рецептури КЕП. КЕП наносили роликівим аплікатором з анілоксовим валом та в якості створення контактної площини обрали метод №3 ламінації мідної шини на КЕП рис. 4.36.



Рисунок 4.36 – Фото гнучкого нагрівального елемента з використанням ламінації

Процес створення гнучкого нагрівального елемента починається з використання субстрату з ПЕТ, на який роликівим аплікатором наноситься шар КЕП. Після нанесення, зразок сушиться 24 години при температурі 25 °С.

Потім зразок піддається ламінуванню, наноситься захисний шар ПЕТ плівки, який вже містить інтегровані мідні шини на своїх краях. Така технологія ламінації забезпечує щільне прилягання шару КЕП до мідних шин без необхідності окремо встановлювати шини на субстрат, що значно спрощує процес виробництва.

Такий підхід дозволяє отримати нагрівальний елемент з удосконаленими контактними поверхнями, завдяки чому електричний контакт між мідними шинами та КЕП є більш надійнішим. Завдяки тиску,

який створюється під час ламінації, досягається не лише механічна інтеграція шин, але й висока якість електричного з'єднання. В результаті, нагрівальний елемент забезпечує ефективний і рівномірний нагрів. Характеристики створеного гнучкого нагрівального елемента довжиною 170 мм та шириною 40 мм наведені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Властивості конструкції гнучкого нагрівального елемента №3

Товщина КЕП, мкм	25		50		100	
Напруга, В	12	24	12	24	12	24
Питома потужність P_{s1} площина, Вт/см ²	0.01	0.02	0.01	0.05	0.03	0.11
Питома потужність P_{s2} переріз, Вт/см ³	1.31	5.23	2.17	8.66	2.71	10.8
Контактний опір, Ом	417		61		31,15	
Опір між контактами, Ом	580		175		70	

Для виготовлення жорстких нагрівальних елементів в якості субстрату обрали ДСП. Наносили КЕП методом розпилення. В якості створення контактної площини обрали два метода, метод без проміжного субстрату №1 та метод з використанням вуглецевого волокна №4.

Перший метод включав в себе використання ДСП плиту, модельну рецептуру КЕП. Як метод нанесення обрали розпилення для рівномірного нанесення КЕП та в якості створення контактної площини обрали метод з використанням вуглецевого волокна №4 без використання ламінації (рис. 4.37).

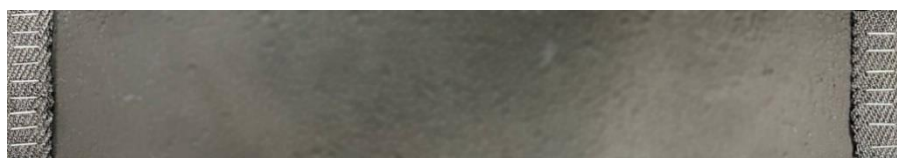


Рисунок 4.37 – Фото жорсткого нагрівального елемента з використанням вуглецевого волокна у якості електропровідної шини.

Створення жорсткого нагрівального елемента розміром 300 мм на 300 мм розпочинається з використання ДСП, що служить основою. На поверхню субстрату за допомогою фарбопульту рівномірно розпилюють шар КЕП.

Після нанесення шару КЕП, зразок залишають сушитися на 24 години при температурі 25°C.

Для створення контактної площини, на висушений КЕП наносять смуги з вуглецевого волокна. Ці смуги закріплюють скобами, забезпечуючи надійний механічний контакт КЕП та волокном.

Характеристики жорсткого нагрівального елемента наведені в табл. 4.5

Таблиця 4.5

Властивості жорсткого нагрівального елемента

Товщина КЕП, мкм	150		200		300	
Напруга, В	12	24	12	24	12	24
Питома потужність P_{s1} площина, Вт/см ²	0.05	0.19	0.08	0.30	0.12	0.48
Питома потужність P_{s2} переріз, Вт/см ³	3.16	12.6	3.79	15.1	3.95	15.7
Контактний опір, Ом	20		17,50		10,05	
Опір між контактами, Ом	55		43		19	

Другий метод виготовлення жорсткого нагрівального елемента включав в себе використання ДСП плити, модельну рецептуру КЕП. КЕП наносили методом розпилення. Для створення контактної площини використовували метод №1 без додаткового субстрату. Завдяки товщині КЕП нівелюється товщина мідної шини таким чином КЕП наноситься рівномірно на субстрат, без використання ламінації рис. 4.38.

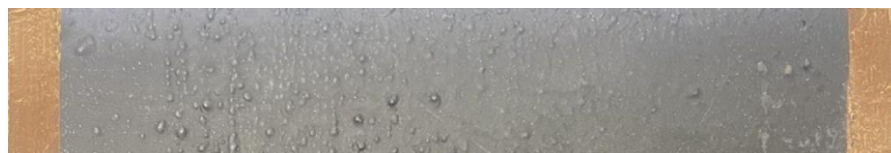


Рисунок 4.38 – Фото жорсткого нагрівального елемента з використанням мідної шини без додаткового субстрату.

Процес створення жорсткого нагрівального елемента розміром 300 мм на 300 мм починається з вибору субстрату - ДСП. По краях ДСП пластини проклеюють мідну шину, яка виконує роль контактної площини для подачі електричного струму.

Після підготовки субстрату на його поверхню методом розпилення за допомогою фарбопульта наносять шар КЕП. Цей метод дозволяє рівномірно покрити велику площу, забезпечуючи однорідний шар з заданою товщиною.

Після нанесення КЕП зразок висушують 24 годин при температурі 25°C. Характеристики жорсткого нагрівального елемента наведені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6

Властивості жорсткого нагрівального елемента

Товщина КЕП, мкм	150		200		300	
Напруга, В	12	24	12	12	24	12
Питома потужність P_{s1} площина, Вт/см ²	0.05	0.21	0.09	0.05	0.21	0.09
Питома потужність P_{s2} переріз, Вт/см ³	3.41	13.6	4.31	3.41	13.6	4.31
Контактний опір, Ом	17		15,50		8,05	
Опір між контактами, Ом	52		41		17	

У ході проведених досліджень, у розділі, було вивчено різні аспекти створення нагрівальних елементів, включаючи вибір субстратів, методів нанесення КЕП, а також способів формування контактної площини. Особливу увагу було приділено аналізу контактного опору та його впливу на ефективність нагрівальних елементів, зокрема на здатність ефективно передавати електричний струм до КЕП для генерації тепла.

Для створення гнучких нагрівальних елементів як основу використовували ПЕТ-плівку, що має достатню гнучкість та міцність. Роликовий аплікатор з анілоксовим валом був визначений як оптимальний метод нанесення КЕП, що дозволяє досягти високої однорідності покриття.

Метод ламінації мідної шини на КЕП був обраний для створення контактної площини, що забезпечує міцний та надійний електричний контакт.

Для жорстких нагрівальних елементів в якості основи обрали ДСП-плиту, яка надає структурну міцність нагрівальному елементу. Метод розпилення був обраний для нанесення КЕП завдяки його здатності ефективно покривати рівні поверхні. Для створення контактної площини використовували пряме нанесення КЕП на субстрат без додаткового субстрату, що спрощує виробництво та знижує витрати.

Дослідження питомої потужності показало, що з товщиною КЕП 10 мікрон при навантаженні 1V було отримано значення 0 Вт/см², що вказує на відсутність ефективного нагріву. Натомість, зі збільшенням товщини КЕП до 300 мікрон, питома потужність зросла до 0,8 Вт/см², демонструючи значне покращення ефективності нагріву зі збільшенням товщини нагрівального елемента. Це вказує на те, що оптимальна товщина КЕП є важливим фактором для досягнення ефективності нагріву, адже вона впливає на здатність елемента ефективно проводити електричний струм і генерувати тепло.

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження властивостей композитних електропровідних покриттів показали, що отримані композиції підходять для виготовлення як гнучких та жорстких нагрівальних елементів, а також як електропровідні покриття для створення гальванічних покриттів. Крім того, отримані полімерні покриття екранують та поглинають електромагнітні хвилі радіодіапазону, що розширює можливості їх застосування.

Отримані результати досліджень, наведених у розділах 3 та 4, дозволили розробити технологічні схеми виготовлення гнучких та жорстких нагрівальних елементів методами отримання композитного полімерного розчину та методом нанесення композитного полімерного розчину

5.1 Технологія одержання нагрівальних елементів

На основі результатів проведених експериментів в 3 та 4 розділах, були розроблені технології виготовлення нагрівальних елементів з використанням двох різних методів нанесення КЕП: ракельного друку на шовкотрафаретній друкарській установці та методу розпилення.

5.1.1 Технологія одержання гнучких нагрівальних елементів з електропровідних полімерних композитних покриттів

Процес виготовлення електропровідних полімерних покриттів включає декілька важливих етапів, кожен з яких підлягає ретельному контролю для забезпечення високої якості кінцевого продукту а саме зважування, змішування, змочування, диспергування та гомогенізації полімерної композитної дисперсії.

Виготовлення гнучких нагрівальних елементів відбувається за допомогою устаткування зображеного на рис. 5.1. Процес виготовлення

складається з двох етапів, а саме приготування композитного полімерного розчину та безпосередньо виготовлення гнучкого нагрівального елемента.

Впроваджена технологія роздільного виготовлення електропровідної композитної полімерної суміші, яка забезпечує високу якість та однорідність кінцевого продукту, демонструє свою універсальність та ефективність у різноманітних застосуваннях.

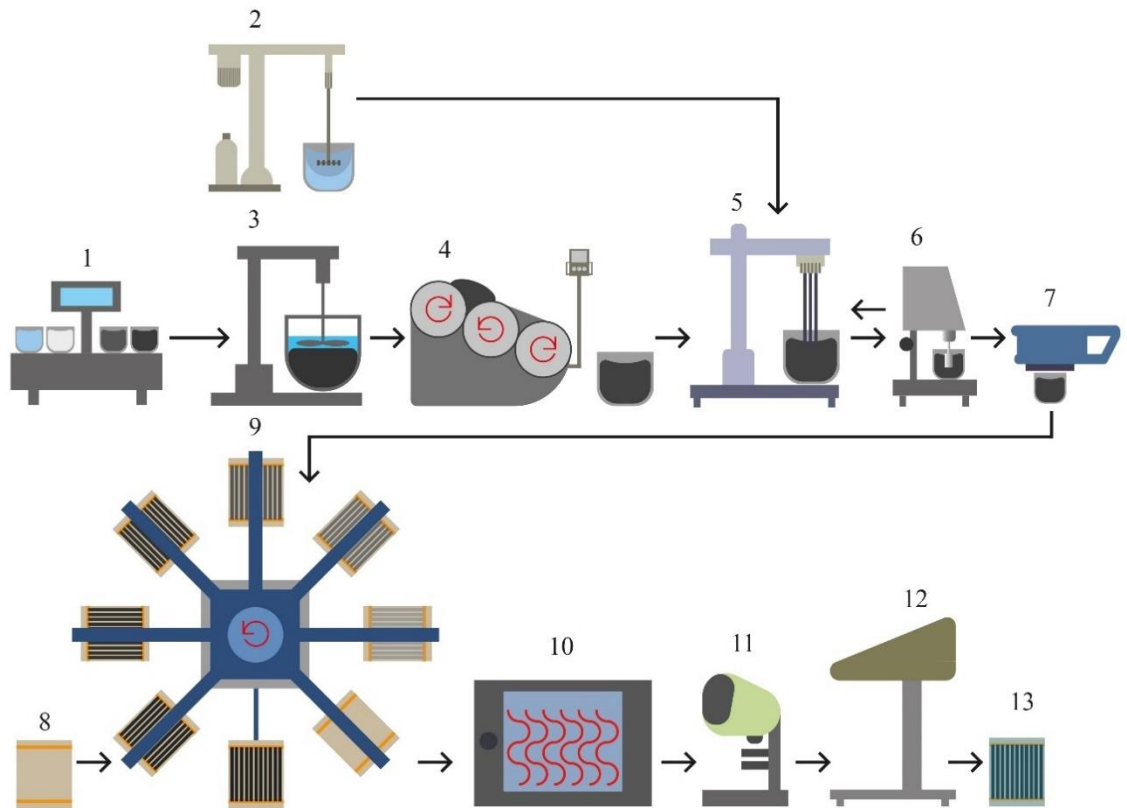


Рисунок 5.1 – Технологічна схема одержання гнучких нагрівальних елементів на основі КЕП: 1 - Зона зважування; 2, 3 - Дисольвер; 4 - Трьох валковий млин; 5 - Диспергатор; 6, 7 – Зона контролю якості; 8 - Гнучкий субстрат; 9 – Шовкографічна друкарська машина; 10 – Зона просушування; 11 - Зона контролю якості; 12 – Зона ламінації та обрізки гнучкого нагрівального елемента; 13 - Гнучкий нагрівальний елемент.

Спочатку відбувається процес зважування компонентів відповідно до заданої рецептури(Табл. 5.1) на вагах 1, після чого дані компоненти (сажа та графіт) перемішуються у планетарному міксері 3 для досягнення бажаної

електропровідності та фізико-механічних властивостей суміші. Після отримання однорідної сухої суміші вона піддається процесу змочування спиртом в планетарному міксері 3. Процес змочування сприяє кращій адгезії між частинками наповнювача та полегшує їхнє подальше диспергування.

Далі, дисперсія отримана на млині 3 поступово подається на тривалковий млин 4, де відбувається контрольне диспергування наповнювача до заданих розмірів. На цьому етапі проводять контрольне вимірювання дисперсності за допомогою гріндометра 7, що дозволяє визначити розмір частинок наповнювача в дисперсії. Також проводять контроль в'язкості та сухого залишку пасти.

Паралельно до попередніх процесів на дисольвері Ross, серія, готується 10% спиртовий розчин ПВБ. Контроль сухого залишку цього розчину є важливим для точного визначення вмісту ПВБ, що забезпечує необхідну концентрацію кінцевої суміші.

Далі відбувається змішування всіх компонентів отриманих на млині 4 та дисольвері 2 у пропорціях згідно рецептури на дисперсері 5, де застосовується фреза типу "точковий ротор/статор" для остаточної диспергації та гомогенізації.

Після змішування проводять контроль дисперсності частинок гріндометром та в'язкості дисперсії за допомогою в'язкозиметра 6, що дозволяє забезпечити оптимальні умови для друку. Якщо в'язкість вища за потрібну дисперсію розбавляють розчинником до необхідних показників.

Таблиця 5.1

Рецептурний склад електропровідного полімерного композитного покриття для гнучкого нагрівального елемента

Компонент	Вміст компоненту, мас. %
ПВБ	29
Dynasylan АМЕО	1
Графіт С0	60
Сажа ХС72	10

Технологічні параметри отримання гнучкого нагрівального елемента

Параметр	Значення
Кількість проходжень на тривалковому млині, разів	5
Зазор на тривалковому млині, μ	10
Швидкість дисольвера, об/хв	1500
Час змішування, хв	30
Швидкість дисперсера, об/хв	3000
Час змішування, хв	15
Оберти планетарного міксера, об/хв	300
Час змішування, хв	30

Далі відбувається виготовлення гнучкого нагрівального елемента 13. Дана технологія нанесення КЕП на ПЕТ плівку дозволяє точно та рівномірно наносити матеріал. Шовкографічна друкарська машина, оснащена точно налаштованими ракелями та високоякісними трафаретами. Дане устаткування забезпечує виняткову точність нанесення, дозволяючи регулювати товщину нанесеного шару фарби для створення точних та рівномірних нагрівальних доріжок гнучких нагрівальних елементів.

Для високоякісного нанесення фарби на ПЕТ плівку необхідний ретельний підбір параметрів ракеля та налаштувань шовкографічної друкарської машини 9. Для нанесення фарби в'язкістю в 100-120 мПа·с при 25 °С вмістом не летких речовин 25% оптимально підходить ракець з середньою твердістю близько 70-75 ША, кут нахилу ракеля 65-70 градусів. Такі параметри ракеля дозволяють ефективно наносити фарбу на ПЕТ плівку, що гарантує однорідність КЕП і точність меж доріжок без ризику їх розмазування.

Рекомендована швидкість нанесення фарби становить близько 35-45 мм/сек. Це дозволить уникнути утворення пустот та забезпечити рівномірне нанесення без переливів.

Тиск на ракель має бути відрегульований в межах 2-4 кг/м, що є критичним параметром для контролю потрібної товщини покриття в діапазоні від 10 до 50 мікрон. Застосування такого тиску дозволяє ракелю ефективно витіснити суміш через трафарет, забезпечуючи необхідну товщину покриття без ризику надмірного видалення матеріалу.

Після етапу нанесення КЕП на поверхню ПЕТ плівки, етапом стає просушування 10, при 50°C та тривалістю 24 години. Даний етап критично важливий для забезпечення не тільки довговічності, але й функціональної ефективності нагрівальних елементів. Для рівномірного та ефективного просушування отриманих нагрівальних елементів застосовують сушильну піч, що дозволяє контролювати температурний режим.

Після завершення процесу сушіння проводиться вимірювання електропровідності за допомогою електроомметра. Що дозволяє детально оцінити електричні характеристики нагрівального елемента та ідентифікувати можливі недоліки у провідності, що є критично важливим для забезпечення якості кінцевого продукту та його надійної роботи.

Останній етап перед ламінацією з мідними контактами включає детальний аналіз та оцінку якості покриття, щоб забезпечити оптимальну передачу електричного струму та ефективне функціонування гнучких нагрівальних елементів.

Після нанесення електропровідної композитної полімерної суміші на ПЕТ-плівку та її просушування, відбувається з'єднання мідних контактів із нагрівальними доріжками. Цей процес виконується за допомогою ламінатора. Важливо відзначити, що первинним проходом ламінуються мідні контакти, які вже інтегровані на ламінаційну стрічку відповідно до розмірів нагрівального елемента, що спрощує процедуру збірки та забезпечує точність контактних з'єднань. Після цього виконується ламінація плівкою, яка допомагає забезпечити додатковий захист та стабільність нагрівальних елементів 12.

Ламінація не лише сприяє надійному механічному з'єднанню та ізоляції нагрівальних доріжок, але й захищає від потенційної корозії та вологи завдяки використанню спеціалізованих ламінаційних матеріалів. Ламінація проводиться за контрольованої температури приблизно 120-130 °С, що є оптимальною для досягнення ефективної адгезії без ризику пошкодження плівки. Тиск для міцного з'єднання без деформації матеріалів, під час процесу ламінації, складає від 2 до 4 кг/см², а швидкість проходження матеріалу через ламінатор від 0,5 до 1 м/хв. Цей комплексний підхід до ламінації є ключовим для забезпечення довговічності та ефективності гнучких нагрівальних елементів 13. Після процесу ламінації відбувається обрізка. Обрізка дозволяє точно сформувані кінцеві розміри та контури нагрівальних елементів. Також проводиться кінцевий контроль якості, де перевіряються питомі показники опору, для забезпечення відповідності всім встановленим технічним нормам і стандартам.

Цільова інтеграція цього обладнання та методів контролю у процес виробництва гнучких нагрівальних елементів забезпечує високу якість кінцевого продукту та його відповідність всім технічним специфікаціям та стандартам.

Технологічні параметри обладнання за наведеною вище технологією виготовлення гнучких нагрівальних елементів, наведені в таблиці 5.3, а властивості готового гнучкого нагрівального елемента наведені в табл. 5.4. Технічні характеристики обладнання для виготогнучкого нагрівального елемента табл. 5.5.

Таблиця 5.3

Технологічні параметри виготовлення гнучкого нагрівального елемента

Параметр	Значення
В'язкість електропровідної полімерної суміші, мПа·с	100-120
Твердість ракелю, ША	70-75
Кут нахилу ракеля, градус	65-70
Швидкість нанесення, мм/сек	35-45
Тиск на ракель, Н/м	19,6-39,2
Час просушування, год	24
Температура просушування, °С	50
Температура ламінації, °С	120-130°С
Тиск ламінації, Н/см ²	19.6-39.2
Швидкість проходження матеріалу через ламінатор, м/хв	0,5

Таблиця 5.4

Параметри готового гнучкого нагрівального елемента

Параметр	Значення	
Товщина КЕП, мкм	50	
Площина, м ²	1	
Питомий об'ємний опір, Ом*см	0,221	
Діапазон питомого поверхневого опора, Ом	40 - 45	
Напруга, В	12	24
Питома потужність, Вт/м ²	14,4	57,6

Таблиця 5.5

Технічні характеристики обладнання для виготовлення гнучкого нагрівального елемента

№	Назва устаткування	Характеристики устаткування
1	Ваги - Ohaus Explorer Precision	Максимальна вага: 12 кг. Дискретність: 0,1 г, Розмір платформи: 377 мм x 311 мм., Повторюваність: 0,1 г.
2	Дисольвер - Ross, серія High Speed Dispersers модель - HSM-100LH-3	Максимальний об'єм – 20 л. Кришка оснащена вікнами для огляду, Диспергуючі леза - Змінні зубчасті леза доступні з діаметрами 5, 7,5, 9, і 10 см., Швидкість - Змінна швидкість до 4800 об/хв., Матеріал - Всі частини, що контактують з рідиною, виготовлені з нержавіючої сталі типу 316.

3	Міксер - Ross Double Planetary Mixer Модель - SXJB-100.	Об'єм - 100 літрів, Вага - 140 кг, Потужність змішування - від 7,5 до 15 кВт, Швидкість змішування - від 0 до 40 об/хв., Швидкість диспергування - від 0 до 72 об/хв., Потужність диспергування - від 11 до 18,5 кВт., Швидкість диспергування (друга) - від 0 до 1450 об/хв.
4	Тривалковий млин - Bühler Group модель - SDVE1300.	Привід - 55 / 75 кВт., Діаметр валків - 400 мм, Швидкість третього валка: 400 об/хв, 500 об/хв, Регулювання розміру зазору – Механічне, Захисний кожух – Включено, Розміри - 1740 мм. 256 мм. 1585 мм. Довжина валків - 1300 мм., Вага - 5700 кг.
5	Дисперсер - Silverson High Shear Batch Mixer.	Об'єм - 4 – 30 л., Робочі головки - змінні робочі головки доступні для всіх моделей, Матеріали конструкції - Контактні з продуктом частини виготовлені з нержавіючої сталі 316L. Специфікація мотора - від 0.1 до 150 кВт., Мотори TEFC, придатні для миття, вибухозахищені, затверджені АТЕХ, і мотори з нержавіючої сталі доступні як стандарт,
6	В'язкозиметр - Brookfield DV-II+ Pro.	Тип - Ротаційний в'язкозиметр, Швидкість обертання: Від 0.1 до 200 об/хв., Можливість з'єднання з комп'ютером.
7	Гріндометр - ВУК-Gardner 2320.	Довжина жолоба - Зазвичай 200-250 мм, Ширина жолоба - Може варіюватися від 50 до 100 мм, Глибина жолоба - 100 мкм. - 0 мкм.
8	Субстрат.	ПЕТ плівка – 100 – 300 мкм.
9	Шелкографічна друкарська машина - M&R Sportsman EXG 5070 8/6.	Споживання повітря - 272 л. на хв. при тиску 6,9 бар, Діаметр станка: 411 см., Споживання – 380В, 50/60 Гц., 3.3 кВт., Максимальний розмір рами - 66 x 109 x 5 см., Розмір друку - 51 x 71 см., Розмір стола - 56 x 76 см., Вага - 1633 кг.
10	Сушильна шафа - Truck Oven, модель TA-550	Робоча температура: 290°C, Потік повітря: Знизу догори, примусова конвекція, Час нагріву: 30 хвилин, Розміри робочого простору: 90 см x 90 см x 150 см.
11	Електроомметр - RM-804.	Тип вимірювання - Чотирьохелектродний метод, Діапазон вимірювань опору - 5 МОм, Роздільна здатність вимірювання опору: 1 мікроом.
12	Ламінатор - D&K Group Express 42 Plus	Електроспоживання - 230В. 60 Гц. 30 А., Швидкість - 0 - 3.05 м/хв., Діапазон температур - до 150°C, Максимальна ширина матеріалу - 105 см.

5.1.2 Технологія одержання жорстких нагрівальних елементів з електропровідних полімерних покриттів

На основі результатів досліджень в 3, 4 розділах, розроблена схема виготовлення жорстких нагрівальних елементів на основі КЕП методом розпилення у камері.

Процес виготовлення жорстких нагрівальних елементів (рис. 5.2) складається з двох етапів, а саме приготування електропровідної композитної полімерної суміші та виготовленням жорсткого нагрівального елемента.

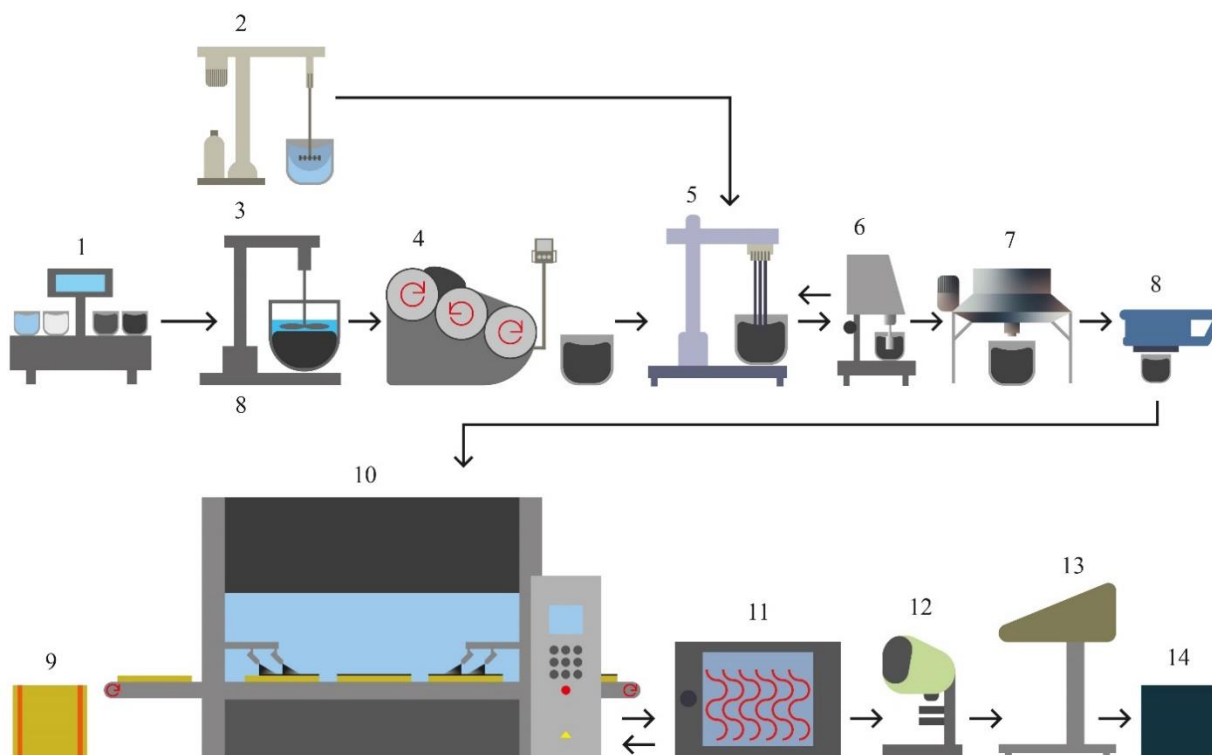


Рисунок 5.2 – Технологічна схема виготовлення жорстких нагрівальних елементів на основі КЕП: 1 - зона зважування; 2 - дисольвер; 3 - планетарний міксер; 4 - тривалковий млин; 5 - дисперсер; 6 - віскозиметр; 7 – зона фільтрації; 8-гріндометр; 9 - жорсткий субстрат; 10 - камера розпилення; 11 - сушка; 12- оптична інспекційна система; 13 - ламінатор; 14 - жорсткий нагрівальний елемент.

Для приготування КЕП використовували наступні компоненти: ізопропиловий спирт, ПВБ, сажу ХС72, графіт С0 та Dynasylan АМЕО.

Процес виготовлення КЕП для виготовлення жорсткого нагрівача починається з точного зважування компонентів 1, після чого сажа та графіт змішуються в планетарному міксері 3, що дозволяє отримати однорідну суху суміш. Подальше змочування цієї суміші ізопропиловим спиртом в планетарному міксері сприяє кращій адгезії між часточками наповнювача. Далі, для досягнення необхідної дисперсності наповнювача, суміш направляється на тривалковий млин, де відбувається її первинне диспергування.

Оцінка дисперсності суміші проводиться за допомогою гріндометра, що дозволяє визначити розмір та розподіл частинок у суміші.

Паралельно, на дисольвері 2 готується 10% розчин ПВБ у спирті, отримані компоненти а саме електропровідна паста та розчин ПВБ змішуються на дисперсері 5. Після ретельного змішування та диспергації ми отримуємо готову фарбу з якої в подальшому відбувається формування КЕП.

Після досягнення бажаної в'язкості, що контролюється в'язкозиметром 6, фарба фільтрується у зоні 7, що гарантує відсутність у фарбі великих агломератів або сторонніх включень перед нанесенням.

Розроблений рецептурний склад композитного полімерного розчину за вище згаданою технологією, наведено в таблиці 5.6 а технологічні параметри одержання в таблиці 5.7.

Таблиця 5.6

Рецептурний склад композитного полімерного розчину

Склад	Вміст компоненту, мас. %
ПВБ	20
Dynasylan АМЕО	2
Графіт С0	58
Сажа ХС72	20

Для виготовлення жорстких нагрівальних елементів за допомогою системи розпилення 10, важливим етапом є інтеграція мідних контактів 9

на жорсткий субстрат перед нанесенням електропровідного композитного полімерного розчину. Це забезпечує пряме з'єднання контактів із майбутнім шаром КЕП, що в свою чергу забезпечує ефективність передачі електричного струму.

Таблиця 5.7

Технологічні параметри отримання композитного полімерного розчину

Параметр	Значення
Тривалковий млин: Кількість проходів матеріалу, разів Зазор між валками, мкм	5 10
Дисольвер: Швидкість змішування, об/хв Час змішування, хв	1500 30
Дисперсер: Швидкість змішування, об/хв Час змішування, хв	3000 15
Планетарний міксер: Швидкість обертання, об/хв Час змішування, хв	300 30

Після інтеграції контактів, система розпилення наносить розчин на поверхню субстрату, створюючи однорідне електропровідне покриття. Процес розпилення вимагає контролю тиску та використання спеціалізованих сопел для досягнення оптимальної якості покриття товщиною від 100-300 мікрон. В'язкість суміші була на рівні 80 мПа*с. Така в'язкість є ідеальною для розпилення, забезпечуючи рівномірне покриття без ризику розтікання чи утворення крапель. Розпилення здійснюється в кілька шарів з просушуванням після кожного шару.

Після фінальної сушки 11 жорстких нагрівальних елементів проводиться ретельний контроль якості, а саме, вимірювання електропровідності за допомогою електрометра 12. Дане вимірювання дозволяє детально оцінити електричні характеристики нагрівального

елемента та ідентифікувати можливі недоліки у провідності, забезпечуючи тим самим високу якість кінцевого продукту 14 і гарантуючи його надійну роботу.

Бажані технологічні параметри обладнання за вище згаданою технологією, наведені в таблиці 5.8, а властивості готового жорсткого нагрівального елемента наведені в табл. 5.9. Характеристики необхідного обладнання для створення жорсткого нагрівального елемента табл. 5.10.

Таблиця 5.8

Технологічні параметри отримання жорсткого нагрівального елемента

Параметр	Значення
В'язкість електропровідної полімерної суміші, мПа·с	80
Діаметр сопла, мм	1,5-2
Швидкість просування субстрату, м/хв	4-5
Тиск у системі розпилення, кПа	800-1000
Проміжна сушка:	
Тривалість, год	2
Температура, °С	60
Фінальна сушка:	
Тривалість, год	36
Температура, °С	50

Таблиця 5.9

Експлуатаційні властивості жорсткого нагрівального елемента

Параметр	Значення	
Товщина КЕП, мкм	300	
Питомий об'ємний опір, Ом*см	0,199	
Питомий поверхневий опір, Ом	6,622	
Площа, м ²	1	
Напруга, В	12	24
Питома потужність, Вт/ м ²	96	384

Характеристики необхідного обладнання для створення жорсткого
нагрівального елемента

№	Назва устаткування	Характеристики устаткування
1	Ваги - Ohaus Explorer Precision	Максимальна вага: 12 кг. Дискретність: 0,1 г, Размер платформи: 377 мм x 311 мм., Повторюваність: 0,1 г.
2	Дисольвер - Ross, серія High Speed Dispersers модель - HSM-100LN-3,	Максимальний об'єм мішання – 20 л. Кришка оснащена вікнами для огляду, Диспергуючі леза - Змінні зубчасті леза доступні з діаметрами 5, 7,5, 9, і 10 см., Швидкість - Змінна швидкість до 4800 об/хв., Матеріал - Всі частини, що контактують з рідиною, виготовлені з нержавіючої сталі типу 316.
3	Міксер - Ross Double Planetary Mixer модель - SXJB-100	Об'єм - 100 літрів, Вага - 140 кг, Потужність змішування - від 7,5 до 15 кВт, Швидкість змішування - від 0 до 40 об/хв., Швидкість диспергування - від 0 до 72 об/хв., Потужність диспергування - від 11 до 18,5 кВт., Швидкість диспергування (друга) - від 0 до 1450 об/хв.
4	Тривалковий млин - Bühler Group модель - SDVE1300	Привід - 55 / 75 кВт., Діаметр валків - 400 мм, Швидкість третього валка: 400 об/хв, 500 об/хв, Регулювання розміру зазору – Механічне, Захисний кожух – Включено, Розміри - 1740 мм. 256 мм. 1585 мм., Довжина валків - 1300 мм., Вага - 5700 кг.
5	Дисперсер - Silverson High Shear Batch Mixer.	Об'єм - 4 – 30 л., Робочі головки - змінні робочі головки доступні для всіх моделей, Матеріали конструкції - Контактні з продуктом частини виготовлені з нержавіючої сталі 316L. Специфікація мотора - від 0.1 до 150 кВт., Мотори TEFC, придатні для миття, вибухозахищені, затверджені АТЕХ, і мотори з нержавіючої сталі доступні як стандарт,
6	В'язкозиметр - Brookfield DV-II+ Pro.	Тип - Ротаційний в'язкозиметр, Швидкість обертання: Від 0.1 до 200 об/хв., Можливість з'єднання з комп'ютером.

7	Вібросито - VIBRO SEPARATOR&FILTER LS-1000-1S	Живлення: 220В, 50/60 Гц, Споживана потужність: Максимум 1А. Частота виходу: 36КHz. Режим роботи: Неперервний режим / Пульсууючий режим. Діаметр сита: 1000 мм.
8	Гріндометр - ВУК-Gardner 2320.	Довжина жолоба - Зазвичай 200-250 мм, Ширина жолоба - Може варіюватися від 50 до 100 мм, Глибина жолоба - Починається з більших розмірів (наприклад, 100 мікрон) та звужується до менших (наприклад, 0 мікрон).
9	Субстрат.	ДСП плівка – 1 – 3 см.
10	Система розпилення - Cefla EASY-DUO.	Робоча ширина: 1300 мм., Витяжка: 12.000 м ³ /год., Регульована швидкість подачі: 2 - 8 м/хв Кількість установлених розпилювальних пістолетів: 8 (4 + 4), Придатність: для розпилення на основі розчинників, Габаритні розміри: довжина приблизно 6152 мм, ширина 3700 мм, висота 2895 мм., Загальна потужність підключення: 18 кВт., Максимальне коливання напруги: +/- 5 %.
11	Сушильна шафа - Truck Oven, модель TA-550	Робоча температура: 290°C, Потік повітря: Знизу догори, примусова конвекція, Час нагріву: 30 хвилин, Розміри робочого простору: 90 см x 90 см x 150 см.
12	Електроомметр - RM-804.	Тип вимірювання - Чотирьохелектродний метод, Діапазон вимірювань опору - 5 МОм, Роздільна здатність вимірювання опору: 1 мікроом.
13	Ламінатор - D&K Group Express 42 Plus	Електроспоживання - 230В. 60 Гц. 30 А., Швидкість - 0 - 3.05 м/хв., Діапазон температур - до 150°C, Максимальна ширина матеріалу - 105 см.

При таких технологічних параметрах ми отримаєм продуктивність 1-2 м/хв.

5.2 Застосування композитного покриття для макетів військової техніки

В умовах активних бойових дій в Україні була висунута пропозиція щодо використання КЕП для створення макетів бойової техніки. Традиційно макети виготовляють з неелектропровідних матеріалів, таких як гума та деревина, що обмежує їхню здатність імітувати реальну військову техніку у контексті електромагнітних властивостей, важливих для радіолокаційної та теплової розвідки.

Було досліджено, що КЕП забезпечують відбиття понад 90% електромагнітного випромінювання у широкому діапазоні частот, стає можливим значно покращити реалістичність макетів. Це дозволяє їм більш ефективно імітувати бойові машини в умовах сучасного поля бою, де використовуються різноманітні засоби виявлення та ідентифікації цілей. Дослідження фарб на предмет їх властивостей щодо відбивання радіохвиль було проведено в рамках співпраці між КНУТД та Державною службою спеціального зв'язку та захисту інформації України, згідно з меморандумом. Дослідження виконувалися за допомогою аналізатора спектра, що дозволило оцінити ефективність відбиття радіохвиль КЕП, що складалось з двох шарів першого або основного(табл. 5.11) та другого або зовнішнього(табл. 5.12), захисного в оптичному діапазоні рис.5.3.

Таблиця 5.11

Рецептурний склад електропровідного композитного полімерного розчину

№	Склад	Вміст компоненту, мас. %
1	ПВБ	20
2	Графіт С0	60
3	Сажа ХС72	20

Згідно з наведеними даними, фарба демонструє відбивальні властивості аналогічні металу. На основі цих властивостей було вирішено застосувати фарбу для покриття танків. Проведені випробування підтвердили ефективність

такого застосування. Виготовлення фарби було здійснено відповідно до умов господарського договору № 1179 КНУТД (Додаток Б).

Таблиця 5.12

Рецептурний склад композитного полімерного розчину зовнішнього шару

№	Склад	Вміст компоненту, мас. %
1	ПВБ	40
2	Оксид хрому	40
3	Карбонат кальцію	15
4	Декабром	5



Рисунок 5.3 – Порівняння відбиття радіохвиль металу та КЕП на не провідному субстраті: 1 - апроксимована базова лінія відбиття металу; 2- КЕП, що складалось з основного та зовнішнього шару нанесеного на ізоляційний субстрат.

Нанесення фарби на макети з ізоляційних матеріалів робить їх виявлення радіолокаційними системами простими, ефективно маскуючи їх під реальну військову техніку. Це відкриває нові перспективи не лише для тренувальних цілей, але й для застосування в тактичних маневрах з метою дезорієнтації противника.

У рамках наукової роботи здобувач активно брав участь у господарському договорі з фірмою, що спеціалізується на розробці КЕП. В ході співпраці було виготовлено партію КЕП, яка була успішно застосована у

макетах бойової техніки. Випробування покриття на макетах продемонстрували позитивні результати, підтверджуючи ефективність технології та її придатність для покращення маскувальних властивостей макетів за допомогою нанесення КЕП на діелектричні основи методом фарбування. рис. 5.4.



Рисунок 5.4 – Зображення макету танка з нанесеним на поверхню КЕП.

Для створення КЕП була використана технологія, описана у розділі 2 наукової роботи, яка включає підбір компонентів розчину, їхнє дозування та оптимізацію параметрів нанесення покриття. Контроль якості нанесеного покриття на макети бойової техніки виконувався за допомогою вимірювань електропровідності з методом Кельвіна чотирохелектродною схемою, що дозволило точно оцінити рівень електропровідності.

Для створення маскувальних властивостей макета танка, виготовленого з фанери, спочатку було нанесено 2 шара електропровідного композитного покриття. Після повного висихання цього шару було застосовано додатковий шар фарби, що містить оксид хрому. Цей верхній шар фарби забезпечував маскування у оптичному діапазоні, допомагаючи макету краще інтегруватися з навколишнім середовищем та знижувати його видимість рецептури електропровідного композитного покриття представлені в табл. 5.11 та рецептура фарби маскування у оптичному діапазоні представлена у табл. 5.12.

Такий підхід дозволяє ефективно комбінувати електропровідні властивості нижнього шару КЕП з оптичними маскувальними властивостями верхнього шару фарби з оксидом хрому. Висновки з дослідження

підтверджують, що така методика є виконуваною та надає перспективні результати у покращенні маскувальних характеристик макетів військової техніки, що продовжує досліджуватись для подальших удосконалень.

Сучасні засоби ураження використовують різні канали для збору та відображення інформації, серед яких основними є: радіолокаційний, оптичний, тепловий.

Для створення макету бойової техніки була розроблена імітація теплової частини на базі жорсткого нагрівального елемента. Цей підхід дозволив не лише досягти ефекту радіолокаційного відбиття, але й відтворити характеристики в тепловому діапазоні, значно підвищивши реалістичність макета для різних методів виявлення, що застосовуються сучасними засобами ураження.

Окремі елементи макета бойової техніки можна зробити із тепловиділенням, використовуючи нагрівальні елементи. Це може бути особливо корисним для імітації теплового випромінювання реальної військової техніки, такої як двигуни або інші компоненти, що виділяють тепло. Нагрівальні елементи можуть бути інтегровані в макет таким чином, щоб їх теплове випромінювання відповідало характеристикам оригінальної бойової техніки, забезпечуючи більшу реалістичність при використанні тепловізійних систем або інших засобів виявлення, заснованих на тепловому відбитті.

Наступний етап полягає у нанесенні композитної фарби на поверхню ДВП, що наноситься за допомогою валика або фарбопульту, забезпечуючи рівномірне нанесення покриття. Таким чином, формується відповідний малюнок, який відтворює тепловий силует бойової техніки. Після нанесення покриття проводиться процес сушіння.

На завершальному етапі до імітатора підключається джерело живлення через мідні контакти, і відбувається тестування системи на відповідність необхідним тепловим характеристикам. Завдяки підведеному електричному струму, нагрівальні елементи імітатора теплової цілі активізуються,

дозволяючи із високою точністю імітувати тепловий контур бойової техніки для ефективного імітування у тепловізійних системах виявлення рис.5.5.

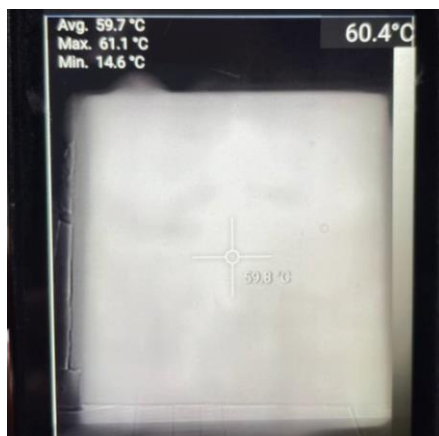


Рисунок 5.5 – Нагрівальний елемент у тепловому діапазоні.

Проведені випробування імітатора теплової цілі на базі макетів бойової техніки показали позитивні результати, однак дослідження продовжуються. Додаткові випробування необхідні для детальнішого аналізу властивостей матеріалів, оптимізації технологічних процесів та розширення можливостей застосування розроблених рішень.

5.2.1 Застосування композитних покриттів для створення мета структури

Запропоновано КЕП застосувати у розробці метаматеріалів. Метаматеріали – це штучно сформовані і особливим чином структуровані середовища, які мають електромагнітні властивості, що виходять за межі властивостей компонентів, з яких вони складаються. Метаматеріали синтезують шляхом введення в природний матеріал різних періодичних структур з найрізноманітнішими геометричними формами, які модифікують діелектричну і магнітну сприйнятливості матеріалу. Метаматеріали відрізняються тим, що їхні властивості можуть змінюватися в залежності від їхньої форми. Одним із застосувань таких метаматеріалів є поглинання

радіохвиль, що робить їх ідеальними для зниження радіолокаційної видимості об'єктів.

Метаматеріали отримані на основі КЕП (рис. 5.6) дозволяють маскувати бойову техніку або інші металеві цілі, роблячи їх менш помітними для ворожих локаторів у широкому діапазоні радіочастот. Таким чином, вони забезпечують важливу тактичну перевагу на полі бою, підвищуючи ефективність захисних та маскувальних заходів.



Рисунок 5.6 – Жорсткий мета матеріал зразок №1: а) Загальний вид метаструктури; б) Деталізований вид з близька.

Для створення метаматеріалів з різноманітними візерунками були виготовлені трафаретні сітки, які дозволяли наносити композитну електропровідну суміш на поверхні з певними малюнками. Метод розпилення був обраний як основний спосіб нанесення КЕП через його ефективність та здатність досягати рівномірного покриття навіть на складних поверхнях. Рецептурний склад КЕП наведений в табл. 5.13.

Створені метаструктури були ретельно протестовані з метою оцінки їх радіозахисних властивостей. Дослідження проводилися за допомогою спектрального аналізатора, який дозволяв детально оцінити спектральні характеристики метаматеріалів і їх ефективність у різних діапазонах частот.

Результати тестувань підтвердили, що застосування розроблених метаматеріалів сприяє значному поглинанню радіохвиль (рис. 5.7).

Таблиця 5.13

Рецептурний склад КЕП що застосовувався для виготовлення метаматеріалів

Склад	Вміст компоненту, мас. %
ПВБ	29
Графіт С0	60
Сажа ХС72	10
Dynasylan АМЕО	1

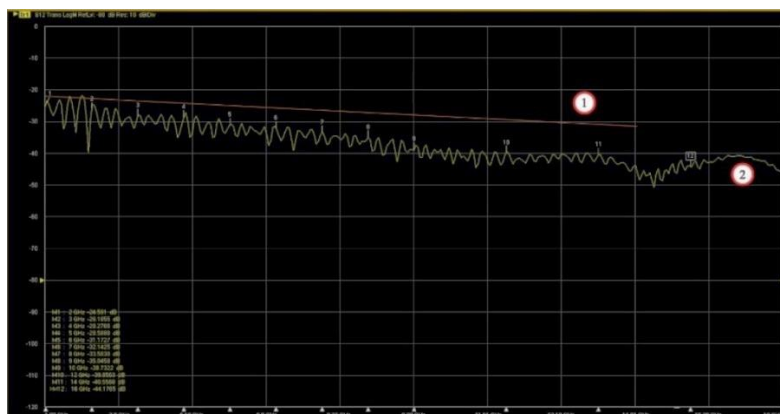


Рисунок 5.7 – Графік відбиття радіохвиль металу та метаструктури №1: 1- апроксимована базова лінія відбиття металу як вихідний рівень для порівняння; 2 - крива поглинання електромагнітного випромінювання метаструктурою у порівнянні з базовою лінією металу.

При вимірюванні в діапазоні від 2 до 18 Гц апроксимована лінія металу знаходиться вище порівняно з лінією метаструктури №1, що свідчить про ефективне поглинання електромагнітних хвиль метаструктурою.

Наступний метод для створення жорстких метаструктур, як основу використано сітку, надруковану на 3D-принтері, на яку потім було нанесено КЕП за допомогою розпилення (рис. 5.8).

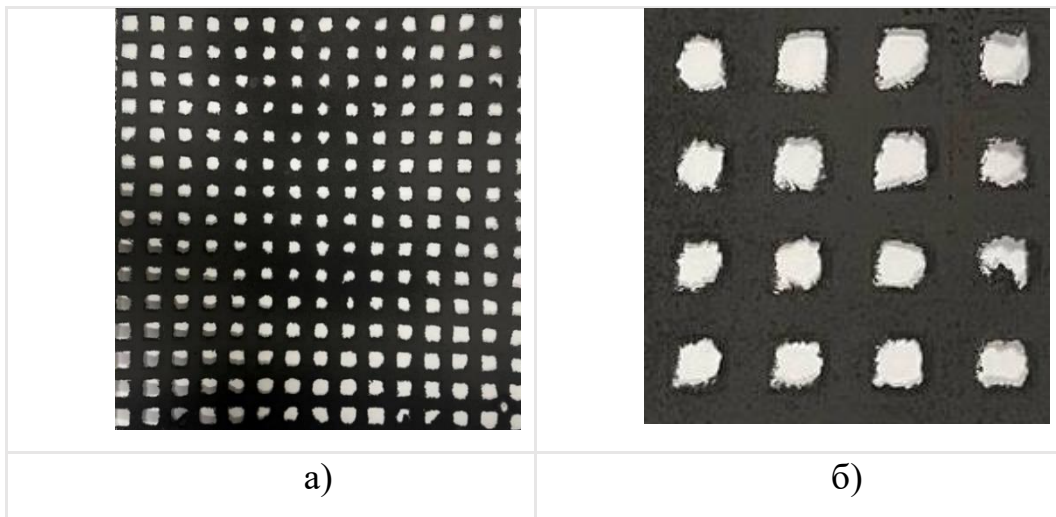


Рисунок 5.8 – Жорсткий мета матеріал зразок №2: а) Загальний вигляд метаструктури; б) Деталізований вид з близька.

Зразок №2 був ретельно протестований з метою оцінки їх властивостей радіозахисних властивостей. Результати вимірювань наведені на малюнку рис.5.9.



Рисунок 5.9 – Порівняння відбиття радіохвиль металу та метаструктури зразок №2: 1- апроксимована базова лінія відбиття металу як вихідний рівень для порівняння; 2- метаструктура у порівнянні з базовою лінією металу.

З аналізу графіка для зразка №1 стає зрозуміло, що при вимірюванні в діапазоні від 2 до 18 герц апроксимована лінія металу знаходиться вище порівняно з лінією метаструктури, що підтверджує ефективне поглинання електромагнітних хвиль метаструктурою. Зокрема, при 7 герцах метаструктура досягла значення поглинання -50 децибелів, при 13 герцах -

45 децибелів, а при 14 герцах -65 децибелів. Ці значення свідчать про значне поглинання електромагнітних хвиль метаструктурою при цих частотах, що є доказом високої ефективності даного матеріалу в певних частотних діапазонах.

Також були розроблені метаструктури на основі плівки, використовуючи технології, аналогічні тим, що застосовуються при виготовленні гнучких нагрівальних елементів. Це дозволило інтегрувати властивості метаматеріалів у гнучкі вироби, розширюючи сфери їх застосування та надаючи нові можливості для створення нових рішень у сфері маскування рис. 5.10.

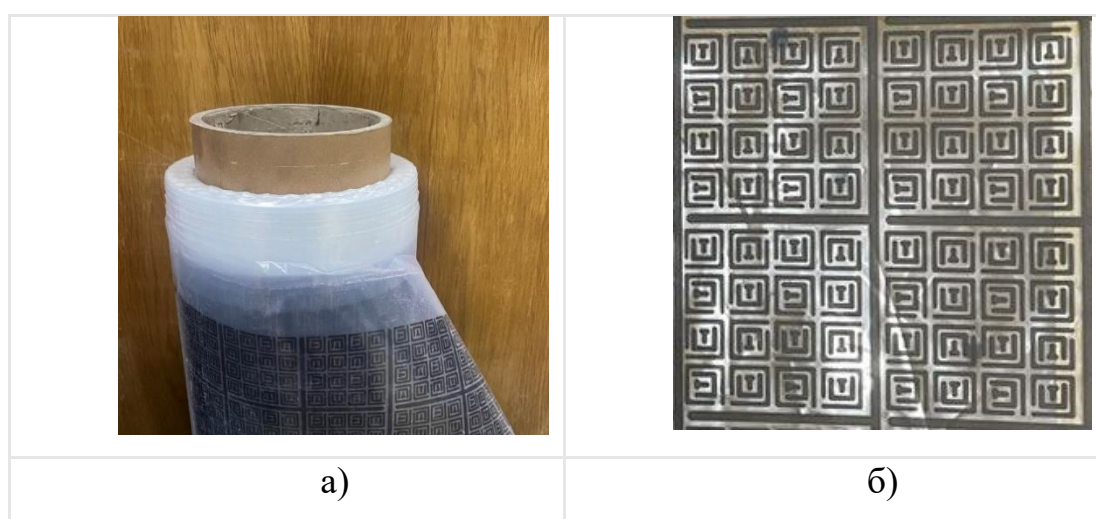


Рисунок 5.10 – Гнучкий мета матеріал зразок №3: а) Загальний вид метаструктури; б) Деталізований вид з близька.

Для виробництва зазначених метаструктур було застосовано промислове друкарське обладнання, зокрема флексографічну друкарську машину. На валі був вирізаний спеціалізований візерунок, призначений для створення такого роду структур. Такий підхід дозволив точно та ефективно наносити візерунки на плівку, формуючи метаструктури з необхідними властивостями та геометрією. Результати вимірювань таких матеріалів зображені на графіку рис. 5.11.

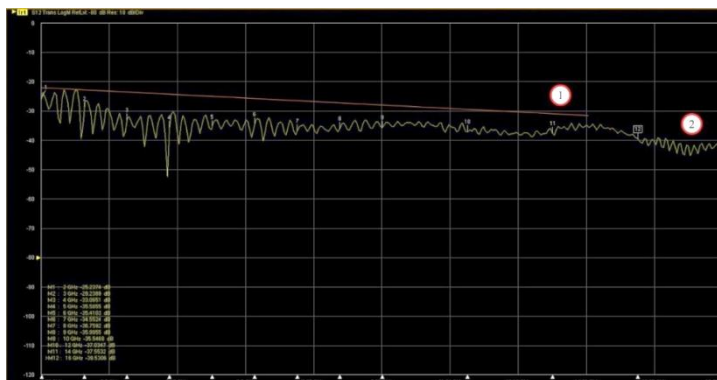


Рисунок 5.11 – Порівняння відбиття радіохвиль металу та гнучкої метаструктури зразок №3: 1- апроксимована базова лінія відбиття металу як вихідний рівень для порівняння; 2- гнучка метаструктура у порівнянні з базовою лінією металу.

Гнучкі метаструктури, розроблені з використанням КЕП, пройшли спеціалізоване тестування, спрямоване на оцінку їх властивостей у контексті поглинання радіохвиль. Ці випробування включали аналіз за допомогою спектрального аналізатора, який дозволив детально вивчити їх спектральні характеристики та визначити ефективність на різних частотах.

Для створення зразка №4 гнучких метаструктур як основу було обрано полімерну сітку з волокон, яка має проміжки 0,5 см. На цю сітку наносили КЕП методом розпилення рис. 5.12.

З аналізу графіка зразка №4 виявлено, що в діапазоні від 2 до 18 герц апроксимована лінія металу перебуває вище порівняно з лінією метаструктури, що демонструє ефективність метаструктури в поглинанні електромагнітних хвиль. Зокрема, при 9 герцах метаструктура показала поглинання на рівні -47 децибелів, при 1 герці -43 децибелів, та при 16 герцах -41 децибелів. Ці показники свідчать про значне поглинання електромагнітних хвиль на зазначених частотах, підтверджуючи високу ефективність метаструктури у специфічних частотних діапазонах.

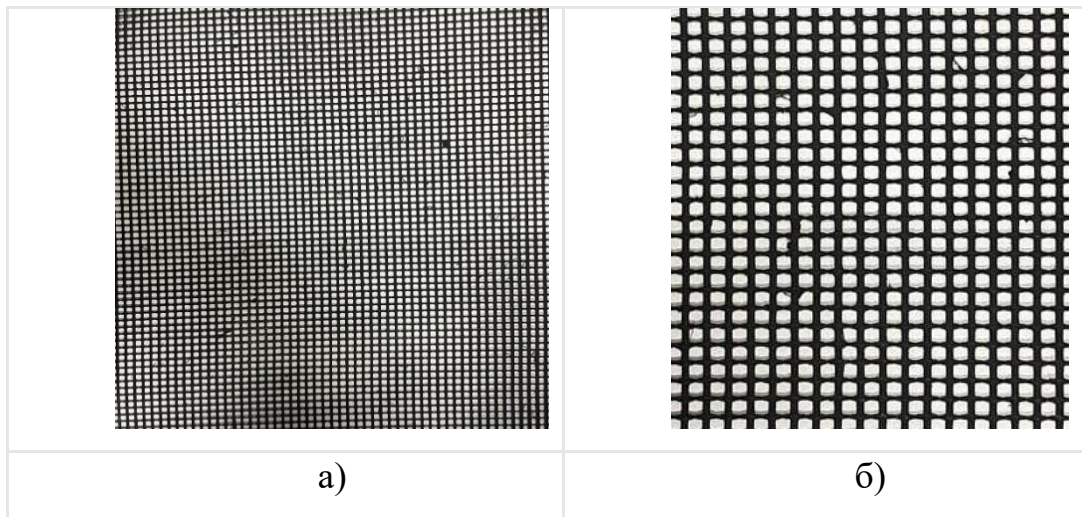


Рисунок 5.12 – Гнучкий мета матеріал зразок №4: а) Загальний вид метаструктури; б) Деталізований вид з близька.

Отримана метаструктура була протестована за допомогою спектрального аналізатора, що дозволило отримати дані, які представлені на рис. 5.13.



Рисунок 5.13 – Порівняння відбиття радіохвиль металу та гнучкої метаструктури зразок №4: 1- апроксимована базова лінія відбиття металу як вихідний рівень для порівняння; 2- гнучка метаструктура у порівнянні з базовою лінією металу.

У рамках меморандуму про співпрацю були виготовлені зразки гнучких метаматеріалів, які підлягали державним випробуванням у Центральному науково-дослідному інституті озброєння та військової техніки Збройних Сил України (Додаток). Ці випробування зосереджувалися на аналізі властивостей

метаматеріалів щодо поглинання та втрат на перевідбиття радіохвиль. Хоча деталі самого протоколу випробувань є конфіденційними. За результатами випробувань було встановлено, що розроблені метаматеріали демонструють ефективні властивості, які роблять їх придатними для застосування, зокрема, в оборонних технологіях для маскуванню або захисту об'єктів від радіолокаційного виявлення рис 5.14.



Рисунок 5.14 – Зразок виготовленого маскувального матеріалу виготовленого з метаструктури.

Зразок, який проходив випробування в Центральному науково-дослідному інституті озброєння та військової техніки Збройних Сил України, отримав позитивне заключення. Це підтверджує, що КЕП можливо використовувати для виготовлення метаструктур. Результати випробувань, викладені в протоколі, вказують на ефективність КЕП у створенні метаструктур з потрібними властивостями. Детальний висновок про результати цих випробувань включено до додатку протоколу.

5.2.2 Використання електропровідних композитних покриттів для створення гальванічних покриттів

У роботі запропоновано використовувати КЕП для нанесення покриттів на вироби одержані 3Д друком. Досліджено різні склади КЕП та виявлено що для нанесення гальванічних покриттів достатній опір складає 10 Ом.

Процес виготовлення електропровідного композитного полімерного розчину для створення гальванічних покриттів розпочинається з підготовки субстрату, зокрема з очищення ізоляційних матеріалів, таких як пластмаси, кераміка або скло. Це забезпечує ідеальну основу для нанесення композитного розчину табл. 5.14.

Таблиця 5.14

Рецептурний склад КЕП для створення гальванічних покриттів

Склад	Вміст компоненту, мас. %
ПВБ	30
Графіт С0	60
Сажа ХС72	10
Dynasylan АМЕО	1

Суміш наноситься на підготовлену поверхню субстрату за допомогою пульверизатора або роликowego аплікатора, залежно від форми та розміру об'єкта, що забезпечує рівномірне покриття. Після нанесення покриття субстрати проходять процес сушіння, що гарантує міцність та стабільність електропровідного шару.

Гальванічний процес включає підготовку електроліту, для якого на 1 літр розчину додається 200 г мідного купоросу, 180 г сірчаної кислоти, 0,07 г тіосечовини та 0,07 г харчової солі. Цей склад сприяє ефективному осадженню міді на підготовленій електропровідній поверхні.

Важливим аспектом процесу гальванізації є підтримання чистоти електродів і регулярне фільтрування електроліту для забезпечення стабільності процесу. Субстрати занурюються в гальванічний розчин, де під впливом стабільного струму, що підтримується блоком живлення (GW Instek GPR-30H10D), відбувається осадження мідного шару.

Після підготовки субстрату та нанесення електропровідної композитної полімерної суміші, ключовим етапом у процесі гальванізації є занурення обробленого субстрату в гальванічний розчин. В цьому процесі важливим є

правильне розташування електродів та заготовки, щоб забезпечити ефективне осадження мідного шару рис. 5.15.

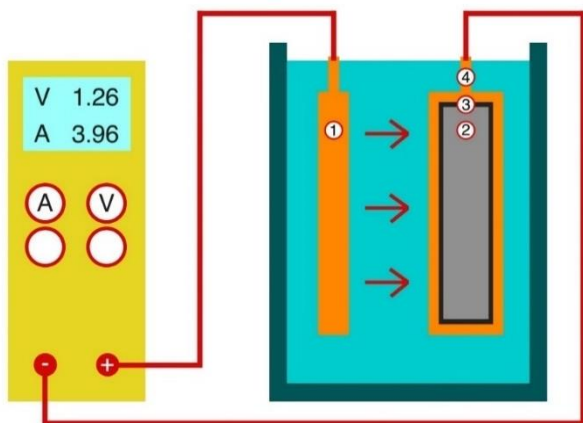


Рисунок 5.15 - Технологічна схема одержання мідного покриття на діелектричній поверхні: 1- мідна пластина; 2- діелектричний виріб; 3- КЕП; 4- гальванічне покриття; 5- блок живлення; 6- ванна з розчином мідного купоросу.

Позитивний полюс блоку живлення (анод) підключається до мідних електродів, які занурені у гальванічний розчин, тоді як негативний полюс (катод) підключається до заготовки з електропровідним покриттям. Ця конфігурація дозволяє використовувати заготовку як катод у гальванічній ванні, що сприяє осадженню мідного шару на поверхні.

Заготовка з електропровідним композитним покриттям розташовується на відстані приблизно 10-15 см від мідних електродів, щоб забезпечити рівномірний розподіл електричного поля та оптимальні умови для гальванічного осадження міді. Це відстань критично важлива для забезпечення однорідності металічного покриття по всій поверхні заготовки та запобігання локального перенасичення або недостатнього осадження міді.

Контроль параметрів електролізу, таких як напруга та струм, відіграє ключову роль у процесі гальванізації, дозволяючи адаптувати процес до конкретних вимог та забезпечити високу якість металічного покриття. Регулювання струму в межах 10-20 мА на квадратний сантиметр поверхні дозволяє досягти оптимальної швидкості осадження міді та забезпечити міцність та однорідність металізованої поверхні. Готовий виріб з гальванічним покриттям зображений на малюнку (рис 5.16).

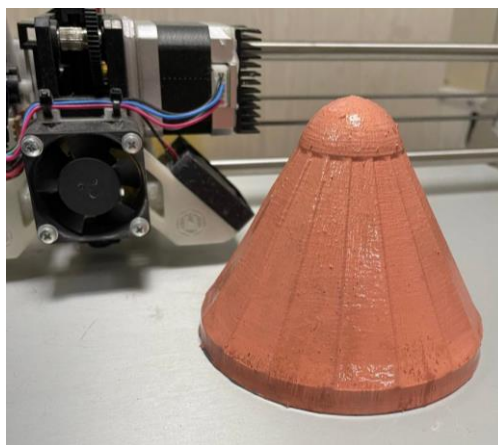


Рисунок 5.16 – Металізований полімерний виріб.

Надрукований на 3D-принтері конус для кумулятивного боєприпасу, який був покритий міддю методом гальваніки, наразі знаходиться на стадії випробувань. Це дозволяє оцінити якість покриття, механічні властивості та ефективність конуса в умовах, максимально наближених до реального використання. Ці дані свідчать про потенціал використання КЕП як альтернативи традиційним методам металізації, зокрема у створенні металевих покриттів на діелектричних основах складної форми.

5.2.3 Використання електропровідних композитних покриттів для створення нетканих матеріалів

В ході досліджень створення КЕП та розробки метаструктур за методом розпилення, було експериментально створено неткані матеріали на основі ПВБ, які включали частки сажі та графіту. Експерименти дозволили оптимізувати рецептуру та встановити оптимальні умови для формування цих нетканих матеріалів табл.5.15.

У процесі створення нетканих матеріалів ключовими є такі параметри: в'язкість розчину та його вміст сухого залишку, який для ефективного формування КЕП повинен становити 40%–50%. Іншим важливим фактором є відстань між розпилювачем та субстратом, що варіюється від 25 до 40 см. Під час розпилення розчину з високим вмістом сухого залишку під тиском, у

просторі між розпилювачем та субстратом формується нетканий матеріал. Швидке випаровування розчинника сприяє створенню делікатної нетканої структури на субстраті. Залишки розчинника в матеріалі забезпечують його адгезію до субстрату, утворюючи неткану структуру рис 5.17.

Таблиця 5.15

Рецептурний склад електропровідного композитного полімерного розчину

№	Склад	Вміст компоненту мас. %
1	ПВБ	30
2	Графіт С0	60
3	Сажа ХС72	10
4	Dynasylan АМЕО	1



Рисунок 5.17 – Нетканий матеріал створений методом розпилення.

Для детального вивчення, створений нетканий матеріал був проаналізований за допомогою електронної мікроскопії. Цей метод дозволив дослідити мікроструктуру нетканого матеріалу, виявити особливості розподілу наповнювачів і оцінити однорідність композитної матриці рис 5. 18.

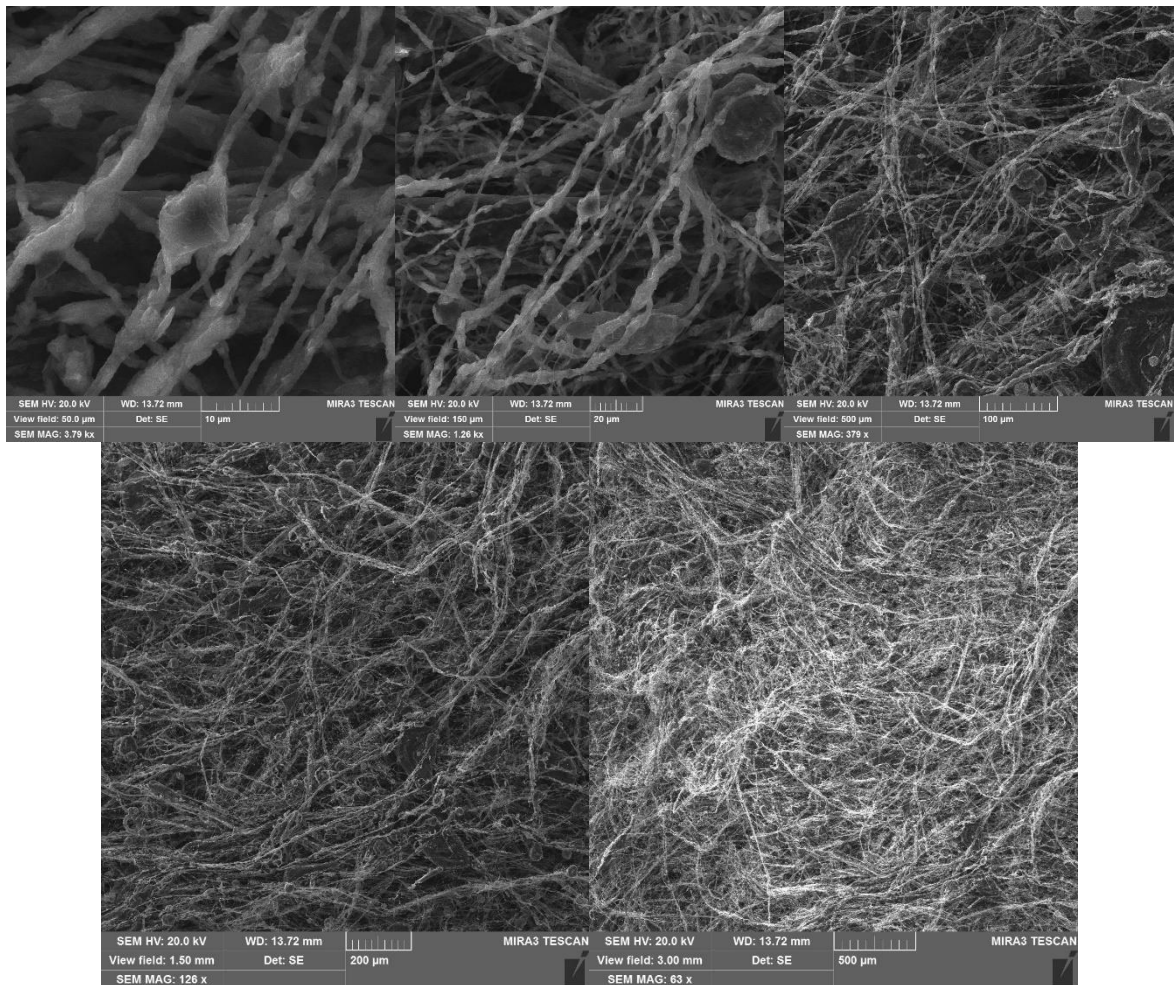


Рисунок 5.18 – СЕМ зображення нетканого матеріалу створеного методом розпилення

З аналізу даних, отриманих за допомогою електронної мікроскопії, встановлено, що у процесі формування нетканого матеріалу методом розпилення утворюються волокна розміром від 10 до 1 мікрона, у яких спостерігаються агломерати графіту чи сажі. Структура нетканого матеріалу виявилася щільною та розвитою, формуючи однорідний візерунок по всій площі.

Додатково було досліджено електропровідні властивості нетканого матеріалу. Питомий поверхневий опір матеріалу товщиною 600 мікрон становив 2200,00 Ом. Крім того, питомий об'ємний опір цього нетканого матеріалу виявився на рівні 132 Ом·см.

Метод розпилення дозволяє ефективно створювати електропровідні неткані матеріали з волокнами до 1 мікрона. Основною перевагою цього методу є здатність швидко перетворювати розчин у нетканий електропровідний матеріал, що відкриває значні можливості для його подальшого застосування та дослідження.

ВИСНОВКИ

В процесі виконання дисертаційної роботи було вирішено важливе науково-прикладне завдання, яке полягає у створенні електропровідних композитних покриттів для гнучких та жорстких нагрівальних елементів технічного призначення.

1. Встановлено вплив технології змішування та дисперсії компонентів композиту на електричні властивості композитних покриттів. Технологія формування композиції з роздільним приготуванням змочених та дисперсних складових дозволила досягти низьких значень питомого опору нарівні $1 \cdot 10^1 \text{ Ом}\square$.

2. Встановлено вплив типу, концентрації складових наповнювача на електричні властивості КЕП. Встановлено, що обрана модельна композиція на основі ПВБ з вмістом графіту марки С0 60% та сажі марки ХС72 10% володіє значенням питомого поверхневого опору $36,5 \text{ Ом}\square$. Введення 1% поверхнево активної речовини Dynasylan АМЕО дозволяє знизити питомий поверхневий опір до $11,74 \text{ Ом}\square$.

3. Встановлено вплив виду полімерної матриці на електропровідність КЕП. Показник питомого поверхневого опору КЕП на основі НЦ складав $15,4 \text{ Ом}\square$, на основі ПУ - $32,2 \text{ Ом}\square$, на основі БС $62,1 \text{ Ом}\square$, а на ПВБ - $36,5 \text{ Ом}\square$. Застосування змішаної полімерної матриці ПВБ та БС при 5% останньої зумовлює зниження питомих показників електропровідності на 13%.

4. Встановлено вплив діелектричного наповнювача на основі карбонату кальцію на модельну рецептуру КЕП. Виявлено зменшення значень питомого опору на 18%.

5. Встановлено експлуатаційні характеристики електропровідних полімерних композитів. Виявлено, що КЕП, який складається з 40% ПВБ, 40% графіту марки С0 і 20% сажі марки ХС72, має найвищий коефіцієнт температурного опору, що складає 0,00107.

6. В результаті дослідження циклічного нагрівання КЕП на основі ПВБ. Виявлено різке зниження опору після першого циклу нагрівання до 110°C, що ймовірно пов'язано зі зміною структури ПВБ.

7. Створено тестові зразки гнучких та жорстких нагрівальних елементів на основі досліджених КЕП. Досягнуто рівень питомої електричної потужності для гнучких нагрівальних елементів при 12 В. - 14,4 Вт/м², та при 24 В. - 57,6 Вт/ м². Для жорстких нагрівальних елементів питома потужність становила при 12 В. - 96 Вт/ м², та при 24 В. - 384 Вт/м².

8. Визначено напрямки застосування електропровідних полімерних композитів і розроблено технологічні схеми для виготовлення гнучких та жорстких нагрівальних елементів.

9. Встановлено здатність розроблених КЕП відбивати електромагнітні хвилі в широкому діапазоні частот. Застосовано розроблене КЕП для покриття макетів бойової техніки.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Thongruang W., Spontak R. J., Balik C. M. Bridged double percolation in conductive polymer composites: an electrical conductivity, morphology and mechanical property study. *Polymer*. 2002. Vol. 43 (13). P. 3717–3725. DOI:[10.1016/S0032-3861\(02\)00180-5](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(02)00180-5).
2. Feller J. F., Chauvelon P., Linossier I., Glouannec P. Characterization of electrical and thermal properties of extruded tapes of thermoplastic conductive polymer composites (CPC). *Polymer Testing*. 2003. Vol. 22. P. 831–837. DOI:[10.1016/S0142-9418\(03\)00020-5](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(03)00020-5).
3. Feller J. F., Linossier I., Grohens Y. Conductive polymer composites: comparative study of poly(ester)-short carbon fibres and poly(epoxy)-short carbon fibres mechanical and electrical properties. *Materials Letters*. 2002. Vol. 57 (1). P. 64–71. DOI:[10.1016/S0167-577X\(02\)00700-0](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00700-0).
4. Chen H., Liu H-B., Li J-X., Li Y., He Y-D. Characteristics and preparation of polymer/graphite composite bipolar plate for PEM fuel cells. *Journal of Composite Materials*. 2009. Vol. 43. P. 755–767. DOI: [10.1177/0021998308101295](https://doi.org/10.1177/0021998308101295).
5. Chunhui S., Mu P., Qin Y., Runzhang Y. Studies on preparation and performance of sodium silicate/graphite conductive composites. *Journal of Composite Materials*. 2006. Vol. 40. P. 839–848. DOI:[10.1177/0021998306061296](https://doi.org/10.1177/0021998306061296).
6. King J. A., Via M. D., Keith J. M., Morrison F. A. Effects of carbon fillers on rheology of polypropylene-based resins. *Journal of Composite Materials*. 2009. Vol. 43. P. 3073–3089. DOI:[10.1002/pc.20830](https://doi.org/10.1002/pc.20830).
7. Dweiri R., Sahari J. Electrical properties of carbon-based polypropylene composites for bipolar plates in polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC). *Journal of Power Sources*. 2007. Vol. 171. P. 424–432. DOI:[10.1016/j.jpowsour.2007.05.106](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.05.106).

8. Petrach E., Abu-Isa I., Wang X. Percolation threshold study of a plasticelastomeric matrix based composite material for bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Composite Materials*. 2012. Vol. 46 (23). P. 2959–2971. DOI:10.1177/0021998311434792.
9. Balogun Y. A., Buchanan R. C. Enhanced percolative properties from partial solubility dispersion of filler phase in conducting polymer composites (CPCs). *Composites Science and Technology*. 2010. Vol. 70. P. 892–900. DOI:10.1016/j.compscitech.2010.01.009.
10. Dweiri R., Sahari J. RETRACTED: microstructural image analysis and structureelectrical conductivity relationship of single- and multiple-filler conductive composites. *Composites Science and Technology*. 2008. Vol. 68 (7-9). P. 1679–1687. DOI: 10.1016/j.compscitech.2008.02.006.
11. Taherian R., Hadianfard M. J., Golikand A. N. A new equation for predicting electrical conductivity of carbon-filled polymer composites used for bipolar plates of fuel cells. *Journal of Applied Polymer Science*. 2013. Vol. 28. P. 1497–1509. DOI:10.1002/app.38295.
12. Balberg I. A comprehensive picture of the electrical phenomena in carbon blackepolymer composites. *Carbon*. 2002. Vol. 40. P. 139–143. DOI:10.1016/S0008-6223(01)00164-6.
13. Barton R., Keith J., King J. Development and modeling of electrically conductive carbon filled liquid crystal polymer composites for fuel cell bipolar plate applications. *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*. 2007. Vol. 10 (4). P. 225–229.
14. Cai W.-Z., Tu S.-T., Gong J.-M. A physically based percolation model of the effective electrical conductivity of particle filled composites. *Journal of Composite Materials*. 2006. Vol. 40 (23). P. 2131–2142. DOI:10.1177/00219983060623.
15. Chippendale R., Golosnoy I. O. Percolation effects in electrical conductivity of carbon fibre composites. *The 8th International Conference on Computation*

- in Electromagnetics*. The Institution of Engineering and Technology, 2011. P. 186–187. DOI: 10.1049/cp.2011.0094.
16. Goncharenko A. V., Venger E. F. Percolation threshold for Bruggeman composites. *Physical Review E*. 2004. Vol. 70. 057102. DOI:10.1103/PhysRevE.70.057102.
 17. Hernandez Y. R., Gryson A., Blighe F. M., Cadek M., Nicolosi V., Blau W. J., et al. Comparison of carbon nanotubes and nanodisks as percolative fillers in electrically conductive composites. *Scripta Materialia*. 2008. Vol. 58. P. 69–72. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2007.08.025.
 18. Kakati B. K., Yamsani V. K., Dhathathreyan K. S., Sathiyamoorthy D., Verma A. The electrical conductivity of a composite bipolar plate for fuel cell applications. *Carbon*. 2009. Vol. 47. P. 2413–2418. DOI:10.1016/j.carbon.2009.04.034.
 19. Keith J. M., King J. A., Barton R. L. Electrical conductivity modeling of carbon-filled liquid-crystalline polymer composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2006. Vol. 102 (4). P. 3293–3300. DOI:10.1002/app.24748.
 20. Lux F. Models proposed to explain the electrical conductivity of mixtures made of conductive and insulating materials. *Journal of Materials Science*. 1993. Vol. 28. P. 285–301. DOI:10.1007/BF00357799.
 21. Mamunya Y. P., Davydenko V. V., Pissis P., Lebedev E. V. Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders. *European Polymer Journal*. 2002. Vol. 38. P. 1887–1897. [DOI:10.1016/S0014-3057\(02\)00064-2](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(02)00064-2).
 22. Merzouki A., Haddaoui N. Electrical conductivity modeling of polypropylene composites filled with carbon black and acetylene black. *ISRN Polymer Science*. 2012. 493065. DOI: 10.5402/2012/493065.
 23. Sohi N. J. S., Bhadra S., Khastgir D. The effect of different carbon fillers on the electrical conductivity of ethylene vinyl acetate copolymer-based

- composites and the applicability of different conductivity models. *Carbon*. 2011. Vol. 49. P. 1349–1361. DOI:10.1016/j.carbon.2010.12.001.
24. Barton R. L., Keith J. M., King J. A. Electrical conductivity model evaluation of carbon fiber filled liquid crystal polymer composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2007. Vol. 106. P. 2456–2462. DOI: DOI:10.1002/APP.26877.
25. Lei H., Pitt W. G., McGrath L. K., Ho C. K. Modeling chemiresistor sensors 1: conductivity model. *AIChE Annual Meeting : Conference Proceedings*. 2004. P. 941–948. URL: <https://folk.ntnu.no/skoge/prost/proceedings/aiche-2004/pdf/papers/041f.pdf> (Last accessed: 23.04.2024).
26. Barton R. L., Keith J., King J. Electrical conductivity modeling of multiple carbon fillers in liquid crystal polymer composites for fuel cell bipolar plate applications. *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*. 2008. Vol. 11 (3). P. 181–186.
27. Vargas-Bernal R., Herrera-Pierrez G., Calixto-Olalde M. E., Tecpoyotl-Torres M. Analysis of DC electrical conductivity models of carbon nanotube-polymer composites with potential application to nanometric electronic devices. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2013. Vol. 2013. 179538. DOI: 10.1155/2013/179538.
28. Kakati B. K., Sathiyamoorthy D., Verma A. Semi-empirical modeling of electrical conductivity for composite bipolar plate with multiple reinforcements. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011. Vol. 36 (22). P. 14851–14857. DOI:10.1016/j.ijhydene.2011.02.136.
29. Zelinka S. L., Glass S. V., Stone D. S. A percolation model for electrical conduction in wood with implications for wood- water relations. *Wood and Fiber Science*. 2008. Vol. 40. P. 544–552.
30. Suherman H., Sahari J., Sulong A. B. Effect of small-sized conductive filler on the properties of an epoxy composite for a bipolar plate in a PEMFC.

- Ceramics International*. 2013. Vol. 39. P. 7159–7166. DOI:10.1016/j.ceramint.2013.02.059.
31. Radhakrishnan S., Ramanujam B. T. S., Adhikari A., Sivaram S. High-temperature, polymeregraphite hybrid composites for bipolar plates: effect of processing conditions on electrical properties. *Journal of Power Sources*. 2007. Vol. 163. P. 702–707. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.08.019.
32. Antunes R. A., de Oliveira M. C. L., Ett G., Ett V. Carbon materials in composite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells: a review of the main challenges to improve electrical performance. *Journal of Power Sources*. 2011. Vol. 196. P. 2945–2961. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2010.12.041.
33. Kassim S. A. E., Achour M. E., Costa L. C., Lahjomri F. Modelling the DC electrical conductivity of polymer/carbon black composites. *Journal of Electrostatics*. 2014. Vol. 72. P. 187–191. DOI: 10.1016/j.elstat.2014.02.002.
34. Takeda T., Shindo Y., Kuronuma Y., Narita F. Modeling and characterization of the electrical conductivity of carbon nanotube-based polymer composites. *Polymer*. 2011. Vol. 52. P. 3852–3856. DOI: 10.1016/j.polymer.2011.06.046.
35. Lee J. H., Jang Y. K., Hong C. E., Kim N. H., Li P., Lee H. K. Effect of carbon fillers on properties of polymer composite bipolar plates of fuel cells. *Journal of Power Sources*. 2009. Vol. 193. P. 523–529. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.04.029.
36. Ausias G., Jarrin J., Vincent M. Optimization of the tube-extrusion die for short-fiber-filled polymers. *Composites Science and Technology*. 1996. Vol. 56. P. 719–724. DOI: 10.1016/0266-3538(96)00012-7.
37. Kuriger R. J., Alam M. K., Anderson D. P., Jacobsen R. L. Processing and characterization of aligned vapor grown carbon fiber reinforced polypropylene. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2002. Vol. 33. P. 53–62. DOI: 10.1016/S1359-835X(01)00070-7.

38. Wood J. R., Zhao Q., Wagner H. D. Orientation of carbon nanotubes in polymers and its detection by Raman spectroscopy. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2001. Vol. 32. P. 391–399. DOI: 10.1016/S1359-835X(00)00105-6.
39. Wang J., Geng C., Luo F., Liu Y., Wang K., Fu Q., et al. Shear induced fiber orientation, fiber breakage and matrix molecular orientation in long glass fiber reinforced polypropylene composites. *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 528 (7). P. 3169–3176. DOI: 10.1016/j.msea.2010.12.081.
40. Taipalus R., Harmia T., Zhang M. Q., Friedrich K. The electrical conductivity of carbon-fibre-reinforced polypropylene/polyaniline complex-blends: experimental characterisation and modelling. *Composites Science and Technology*. 2001. Vol. 61 (6). P. 801–814. DOI: 10.1016/S0266-3538(00)00183-4.
41. Tang W., Santare M. H., Advani S. G. Melt processing and mechanical property characterization of multi-walled carbon nanotube/high density polyethylene (MWNT/HDPE) composite films. *Carbon*. 2003. Vol. 41. P. 2779–2785. DOI: 10.1016/S0008-6223(03)00387-7.
42. Fan Z., Advani S. G. Characterization of orientation state of carbon nanotubes in shear flow. *Polymer*. 2005. Vol. 46. P. 5232–5240. DOI: 10.1016/J.POLYMER.2005.04.008.
43. Kim Y. A., Hayashi T., Endo M., Gotoh Y., Wada N., Seiyama J. Fabrication of aligned carbon nanotube-filled rubber composite. *Scripta Materialia*. 2006. Vol. 54 (1). P. 31–35. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2005.09.014.
44. Koepplmayr T., Milosavljevic I., Aigner M., Hasslacher R., Plank B., Salaberger D., et al. Influence of fiber orientation and length distribution on the rheological characterization of glass-fiber-filled polypropylene. *Polymer Testing*. 2013. Vol. 32 (3). P. 535–544. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2013.02.002.

45. Hine P. J., Davidson N., Duckett R. A., Ward I. M. Measuring the fibre orientation and modelling the elastic properties of injection-moulded long-glass-fibre-reinforced nylon. *Composites Science and Technology*. 1995. Vol. 53. P. 125–131. DOI: 10.1016/0266-3538(95)00011-9.
46. Clingerman M. L., King J. A., Schulz K. H., Meyers J. D. Evaluation of electrical conductivity models for conductive polymer composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2002. Vol. 83. P. 1341–1356. DOI: 10.1002/app.10014.
47. Wang S. F., Ogale A. A. Simulation of percolation behavior of anisotropic short-fiber composites with a continuum model and non-cubic control geometry. *Composites Science and Technology*. 1993. Vol. 46 (4). P. 389–398. DOI: 10.1016/0266-3538(93)90184-I.
48. Lyu L., Liu J., Liu H., Liu C., Lu Y., Sun K., Wujcik E. K., et al. An overview of electrically conductive polymer nanocomposites toward electromagnetic interference shielding. *Engineered Science*. 2018. Vol. 2 (59). P. 26–42. DOI: 10.30919/es8d615.
49. Chen M., Li K., Cheng G., He K., Li W., Zhang D., Li W., Feng Y., Wei L., Li W. et al. Touchpoint-Tailored Ultra-Sensitive Piezoresistive Pressure Sensors with a Broad Dynamic Response Range and Low Detection Limit. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2018. Vol. 11. P. 2551–2558. DOI: 10.1021/acsami.8b20284.
50. Chen J., Li H., Yu Q., Hu Y., Cui X., Zhu Y., Jiang W. Strain Sensing Behaviors of Stretchable Conductive Polymer Composites Loaded with Different Dimensional Conductive Fillers. *Composites Science and Technology*. 2018. Vol. 168 (10). P. 388–396. DOI: 10.1016/j.compscitech.2018.10.025.
51. Sekitani T., Noguchi Y., Hata K., Fukushima T., Aida T., Someya T. A Rubberlike Stretchable Active Matrix Using Elastic Conductors. *Science*. 2008. Vol. 321. P. 1468–1472. DOI: 10.1126/science.1160309.

52. Alexopoulos N. D., Bartholome C., Poulin P., Marioli-Riga Z. Structural Health Monitoring of Glass Fiber Reinforced Composites Using Embedded Carbon Nanotube (CNT) Fibers. *Composites Science and Technology*. 2010. Vol. 70. P. 260–271. DOI: 10.1016/j.compscitech.2009.10.017.
53. Bautista-Quijano J. R., Aviles F., Aguilar J. O., Tapia A. Strain Sensing Capabilities of a Piezoresistive MWCNT-Polysulfone Film. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2010. Vol. 159. P. 135–140. DOI: 10.1016/j.sna.2010.03.005.
54. Gao S-l., Zhuang R.-C., Zhang J., Liu J.-W., Mader E. Glass Fibers with Carbon Nanotube Networks as Multifunctional Sensors. *Advanced Functional Materials*. 2010. Vol. 20. P. 1885–1893. DOI: 10.1002/adfm.201000283.
55. Hu N., Karube Y., Arai M., Watanabe T., Yan C., Li Y., Liu Y., Fukunaga H. Investigation on Sensitivity of a Polymer/Carbon Nanotube Composite Strain Sensor. *Carbon*. 2010. Vol. 48. P. 680–687. DOI: 10.1016/j.carbon.2009.10.012.
56. Murugaraj P., Mainwaring D., Khelil N. A., Peng J. L., Siegele R., Sawant P. The Improved Electromechanical Sensitivity of Polymer Thin Films Containing Carbon Clusters Produced in Situ by Irradiation with Metal Ions. *Carbon*. 2010. Vol. 48. P. 4230–4237. DOI: 10.1016/j.carbon.2010.07.026.
57. Rogers J. A., Someya T., Huang Y. Materials and Mechanics for Stretchable Electronics. *Science*. 2010. Vol. 327. P. 1603–1607. DOI: 10.1126/science.1182383.
58. Shin M. K., Oh J., Lima M., Kozlov M. E., Kim S. J., Baughman R. H. Elastomeric Conductive Composites Based on Carbon Nanotube Forests. *Advanced Materials*. 2010. Vol. 22. P. 2663–2667. DOI: 10.1002/adma.200904270.
59. Eswaraiyah V., Balasubramaniam K., Ramaprabhu S. Functionalized Graphene Reinforced Thermoplastic Nanocomposites as Strain Sensors in Structural

- Health Monitoring. *Journal of Materials Chemistry*. 2011. Vol. 21. P. 12626–12628. DOI: 10.1039/c1jm12302e.
60. Gao L., Chou T.-W., Thostenson E. T., Zhang Z., Coulaud M. In Situ Sensing of Impact Damage in Epoxy/Glass Fiber Composites Using Percolating Carbon Nanotube Networks. *Carbon*. 2011. Vol. 49. P. 3382–3385. DOI: 10.1016/j.carbon.2011.04.003.
61. Granero A. J., Wagner P., Wagner K., Razal J. M., Wallace G. G., Panhuis M. I. H. Highly Stretchable Conducting SIBS-P3HT Fibers. *Advanced Functional Materials*. 2011. Vol. 21. P. 955–962. DOI: 10.1002/adfm.201001460.
62. Hwang J., Jang J., Hong K., Kim K. N., Han J. H., Shin K., Park C. E. Poly(3-Hexylthiophene) Wrapped Carbon Nanotube/Poly(Dimethylsiloxane) Composites for Use in Finger-Sensing Piezoresistive Pressure Sensors. *Carbon*. 2011. Vol. 49. P. 106–110. DOI: 10.1016/j.carbon.2010.08.048.
63. Kollosche M., Stoyanov H., Laflamme S., Kofod G. Strongly Enhanced Sensitivity in Elastic Capacitive Strain Sensors. *Journal of Materials Chemistry*. 2011. Vol. 21. P. 8292–8294. DOI: 10.1039/c0jm03786a.
64. Shang S., Zeng W., Tao X.-m. High Stretchable MWNTs/Polyurethane Conductive Nanocomposites. *Journal of Materials Chemistry*. 2011. Vol. 21. P. 7274–7280. DOI: 10.1039/c1jm10255a.
65. Wakuda D., Suganuma K. Stretchable Fine Fiber with High Conductivity Fabricated by Injection Forming. *Applied Physics Letters*. 2011. Vol. 98. 073304. DOI: 10.1063/1.3555433.
66. Ahn J.-H., Je J. H. Stretchable Electronics: materials, Architectures and Integrations. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2012. Vol. 45. 103001. DOI: 10.1088/0022-3727/45/10/103001.
67. Lu N., Lu C., Yang S., Rogers J. Highly Sensitive Skin-Mountable Strain Gauges Based Entirely on Elastomers. *Advanced Functional Materials*. 2012. Vol. 22. P. 4044–4050. DOI: 10.1002/adfm.201200498.

68. Lin L., Deng H., Gao X., Zhang S., Bilotti E., Peijs T., Fu Q. Modified Resistivity-Strain Behavior through the Incorporation of Metallic Particles in Conductive Polymer Composite Fibers Containing Carbon Nanotubes. *Polymer International*. 2013. Vol. 62. P. 134–140. DOI: 10.1002/pi.4291.
69. Lin L., Liu S., Fu S., Zhang S., Deng H., Fu Q. Fabrication of Highly Stretchable Conductors via Morphological Control of Carbon Nanotube Network. *Small*. 2013. Vol. 9. P. 3620–3629. DOI: 10.1002/sml.201202306.
70. Lin L., Liu S., Zhang Q., Li X., Ji M., Deng H., Fu Q. Towards Tunable Sensitivity of Electrical Property to Strain for Conductive Polymer Composites Based on Thermoplastic Elastomer. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2013. Vol. 5. P. 5815–5824. DOI: 10.1021/am401402x.
71. Deng H., Ji M., Yan D., Fu S., Duan L., Zhang M., Fu Q. Towards Tunable Resistivity-Strain Behavior through Construction of Oriented and Selectively Distributed Conductive Networks in Conductive Polymer Composites. *Journal of Materials Chemistry A*. 2014. Vol. 2. P. 10048–10058. DOI: 10.1039/C4TA01073F.
72. Li M., Li H., Zhong W., Zhao Q., Wang D. Stretchable Conductive Polypyrrole/Polyurethane (PPy/PU) Strain Sensor with Netlike Microcracks for Human Breath Detection. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2014. Vol. 6. P. 1313–1319. DOI: 10.1021/am4053305.
73. Roh E., Hwang B. U., Kim D., Kim B. Y., Lee N. E. Stretchable, Transparent, Ultrasensitive, and Patchable Strain Sensor for Human-Machine Interfaces Comprising a Nanohybrid of Carbon Nanotubes and Conductive Elastomers. *ACS Nano*. 2015. Vol. 9. P. 6252–6261. DOI: 10.1021/acsnano.5b01613.
74. Li Q., Liu H., Zhang S., Zhang D., Liu X., He Y., Mi L., Zhang J., Liu C., Shen C., Guo Z. Superhydrophobic Electrically Conductive Paper for Ultrasensitive Strain Sensor with Excellent Anticorrosion and Self-Cleaning Property. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2019. Vol. 11. P. 21904–21914. DOI: 10.1021/acsami.9b03421.

75. Chen X., Liu H., Zheng Y., Zhai Y., Liu X., Liu C., Mi L., Guo Z., Shen C. Highly Compressible and Robust Polyimide/Carbon Nanotube Composite Aerogel for High-Performance Wearable Pressure Sensor. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2019. Vol. 11. P. 42594–42606. DOI: 10.1021/acsami.9b14688.
76. Wan Y., Qiu Z., Hong Y., Wang Y., Zhang J., Liu Q., Wu Z., Guo C. F. A Highly Sensitive Flexible Capacitive Tactile Sensor with Sparse and High-Aspect-Ratio Microstructures. *Advanced Electronic Materials*. 2018. Vol. 4. 1700586. DOI: 10.1002/aelm.201700586.
77. You X., He J., Nan N., Sun X., Qi K., Zhou Y., Shao W., Liu F., Cui S. Stretchable Capacitive Fabric Electronic Skin Woven by Electrospun Nanofiber Coated Yarns for Detecting Tactile and Multimodal Mechanical Stimuli. *Journal of Materials Chemistry C*. 2018. Vol. 6. P. 12981–12991. DOI: 10.1039/C8TC03631D.
78. Lee J., Kwon H., Seo J., Shin S., Koo J. H., Pang C., Son S., Kim J. H., Jang Y. H., Kim D. E., Lee T. Conductive Fiber-Based Ultrasensitive Textile Pressure Sensor for Wearable Electronics. *Advanced Materials*. 2015. Vol. 27. P. 2433–2439. DOI: 10.1002/adma.201500009.
79. Zhang Y., Fang Y., Li J., Zhou Q., Xiao Y., Zhang K., Luo B., Zhou J., Hu B. Dual-Mode Electronic Skin with Integrated Tactile Sensing and Visualized Injury Warning. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017. Vol. 9. P. 37493–37500. DOI: 10.1021/acsami.7b13016.
80. Lonergan M. C., Brett E. J. S., Doleman J., Beaber S. A., Grubbs R. H., Lewis N. S. Array-Based Vapor Sensing Using Chemically Sensitive, Carbon Black-Polymer Resistors. *Chemistry of Materials*. 1996. Vol. 8. P. 2298–2312. DOI: 10.1021/cm960036j.
81. Li J. R., Xu J. R., Zhang M. Q., Rong M. Z. Carbon Black/Polystyrene Composites as Candidates for Gas Sensing Materials. *Carbon*. 2003. Vol. 41. P. 2353–2360. DOI: 10.1016/S0008-6223(03)00273-2.

82. Shevade A. V., Ryan M. A., Homer M. L., Manfreda A. M., Zhou H., Manatt K. S. Molecular Modeling of Polymer Composite-Analyte Interactions in Electronic Nose Sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2003. Vol. 93. P. 84–91. DOI: 10.1016/S0925-4005(03)00245-4.
83. Dong X. M., Fu R. W., Zhang M. Q., Zhang B., Rong M. Z. Electrical Resistance Response of Carbon Black Filled Amorphous Polymer Composite Sensors to Organic Vapors at Low Vapor Concentrations. *Carbon*. 2004. Vol. 42. P. 2551–2559. DOI: 10.1016/j.carbon.2004.05.034.
84. Lewis N. S. Comparisons between Mammalian and Artificial Olfaction Based on Arrays of Carbon Black–Polymer Composite Vapor Detectors. *Accounts of Chemical Research*. 2004. Vol. 37. P. 663–672. DOI: 10.1021/ar030120m.
85. Feller J. F., Guezenoc H., Bellegou, H., Grohens, Y. Smart Poly(Styrene)/Carbon Black Conductive Polymer Composites Films for Styrene Vapour Sensing. *Macromolecular Symposia*. 2005. Vol. 222. P. 273–280. DOI: 10.1002/masy.200550436.
86. Castro M., Lu J., Bruzard S., Kumar B., Feller J.-F. Carbon Nanotubes/Poly (Epsilon-Caprolactone) Composite Vapour Sensors. *Carbon*. 2009. Vol. 47. P. 1930–1942. DOI: 10.1016/j.carbon.2009.03.037.
87. Castro M., Kumar B., Feller J. F., Haddi Z., Amari A., Bouchikhi B. Novel e-Nose for the Discrimination of Volatile Organic Biomarkers with an Array of Carbon Nanotubes (CNT) Conductive Polymer Nanocomposites (CPC) Sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2011. Vol. 159. P. 213–219. DOI: 10.1016/j.snb.2011.06.073.
88. Li Y., Potschke P., Pionteck J., Voit B. Electrical and Vapor Sensing Behaviors of Polycarbonate Composites Containing Hybrid Carbon Fillers. *European Polymer Journal*. 2018. Vol. 108. P. 461–471. DOI:10.1016/j.eurpolymj.2018.09.027.
89. Bora A., Mohan K., Pegu D., Gohain C. B., Dolui S. K. A Room Temperature Methanol Vapor Sensor Based on Highly Conducting Carboxylated Multi-

- Walled Carbon Nanotube/Polyaniline Nanotube Composite. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2017. Vol. 253. P. 977–986. DOI: 10.1016/j.snb.2017.07.023.
90. Benlikaya R., Slobodian P., Proisl K., Cvelbar U., Morozov I. Ascertaining the Factors That Influence the Vapor Sensor Response: The Entire Case of MWCNT Network Sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2019. Vol. 283. P. 478–486. DOI: 10.1016/j.snb.2018.11.160.
91. Qiang F., Dai S.-W., Zhao L., Gong L.-X., Zhang G.-D., Jiang J.-X., Tang L.-C. An Insulating Second Filler Tuning Porous Conductive Composites for Highly Sensitive and Fast Responsive Organic Vapor Sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2019. Vol. 285. P. 254–263. DOI: 10.1016/j.snb.2019.01.043.
92. Wu W., Shi N., Zhang J., Wu X., Wang T., Yang L., Yang R., Ou C., Xue W., Feng X., et al. Electrospun Fluorescent Sensors for the Selective Detection of Nitro Explosive Vapors and Trace Water. *Journal of Materials Chemistry A*. 2018. Vol. 6. P. 18543–18550. DOI: 10.1039/C8TA01861H.
93. Singhal P., Mazumdar P., Rattan S. One Pot Synthesis of Free Standing Highly Conductive Polymer Nanocomposite Films: Towards Rapid BTX Vapor Sensor. *Polymer Engineering & Science*. 2018. Vol. 58. P. 1074–1081. DOI: 10.1002/pen.24669.
94. Sheng J., Zeng X., Zhu Q., Yang Z., Zhang X. Facile Fabrication of CNT-Based Chemical Sensor Operating at Room Temperature. *Materials Research Express*. 2017. Vol. 4. 125701. DOI: 10.1088/2053-1591/aa9ac7.
95. Yan H., Zhong M., Lv Z., Wan P. Stretchable Electronic Sensors of Nanocomposite Network Films for Ultrasensitive Chemical Vapor Sensing. *Small*. 2017. Vol. 13. 1701697. DOI: 10.1002/sml.201701697.
96. Li Y., Zheng Y., Zhan P., Zheng G., Dai K., Liu C., Shen C. Vapor Sensing Performance as a Diagnosis Probe to Estimate the Distribution of Multi-Walled Carbo Nanotubes in Poly(Lactic Acid)/Polypropylene Conductive

- Composites. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2018. Vol. 255. P. 2809–2819. DOI: 10.1016/j.snb.2017.09.098.
97. Patel S. V., Cemalovic S., Tolley W. K., Hobson S. T., Anderson R., Fruhberger B. Implications of Thermal Annealing on the Benzene Vapor Sensing Behavior of PEVA-Graphene Nanocomposite Threads. *ACS Sensors*. 2018. Vol. 3. P. 640–647. DOI: 10.1021/acssensors.7b00912.
98. Gao J., Wang H., Huang X., Hu M., Xue H., Li R. K. Y. A Super-Hydrophobic and Electrically Conductive Nanofibrous Membrane for a Chemical Vapor Sensor. *Journal of Materials Chemistry A*. 2018. Vol. 6. P. 10036–10047. DOI: 10.1039/C8TA02356E.
99. Marriam I., Wang X., Tebyetekerwa M., Chen G., Zabihi F., Pionteck J., Peng S., Ramakrishna S., Yang S., Zhu M. A Bottom-up Approach to Design Wearable and Stretchable Smart Fibers with Organic Vapor Sensing Behaviors and Energy Storage Properties. *Journal of Materials Chemistry A*. 2018. Vol. 6. P. 13633–13643. DOI: 10.1039/C8TA03262A.
100. Chiou J. C., Wu C. C., Huang Y. C., Chang S. C., Lin T. M. Effects of Operating Temperature on Droplet Casting of Flexible Polymer/Multi-Walled Carbon Nanotube Composite Gas Sensors. *Sensors*. 2016. Vol. 17. 4. DOI: 10.3390/s17010004.
101. Liu H., Huang W., Yang X., Dai K., Zheng G., Liu C., Shen C., Yan X., Guo J., Guo Z. Organic Vapor Sensing Behaviors of Conductive Thermoplastic Polyurethane-Graphene Nanocomposites. *Journal of Materials Chemistry C*. 2016. Vol. 4. P. 4459–4469. DOI: 10.1039/C6TC00987E.
102. Poetschke P., Andres T., Villmow T., Pegel S., Bruenig H., Kobashi K., Fischer D., Haeussler L. Liquid Sensing Properties of Fibres Prepared by Melt Spinning from Poly(Lactic Acid) Containing Multi-Walled Carbon Nanotubes. *Composites Science and Technology*. 2010. Vol. 70. P. 343–349. DOI: 10.1016/j.compscitech.2009.11.005.

103. Kaltenbrunner M., Sekitani T., Reeder J., Yokota T., Kuribara K., Tokuhara T., Drack M., Schwodiauer R., Graz I., Bauer-Gogonea S., Bauer S., Someya T. An ultra-lightweight design for imperceptible plastic electronics. *Nature*. 2013. Vol. 499. P. 458–463. DOI: 10.1038/nature12314.
104. Futaba D. N., Hata K., Yamada T., Hiraoka T., Hayamizu Y., Kakudate Y., Tanaike O., Hatori H., Yumura M., Iijima S., Shape-engineerable and highly densely packed single-walled carbon nanotubes and their application as super-capacitor electrodes. *Nature Materials*. 2006. Vol. 5. P. 987–994. DOI: 10.1038/nmat1782.
105. Guo Z., Sun C., Zhao J., Cai Z., Ge F. Low-Voltage Electrical Heater Based on One-Step Fabrication of Conductive Cu Nanowire Networks for Application in Wearable Devices. *Advanced Materials Interfaces*. 2021. Vol. 8. 2001695. DOI:10.1002/admi.202001695.
106. Kim Y., Kim T., Lee J., Choi Y. S., Moon J., Park S. Y., Lee T. H., Park H. K., Lee S. A, Kwon M. S., Byun H.-G., Lee J.-H., Lee M.-G. Tailored Graphene Micropatterns by Wafer-Scale Direct Transfer for Flexible Chemical Sensor Platform. *Advanced Materials*. 2021. Vol. 33 (2). 2004827. DOI: 10.1002/adma.202004827.
107. Gueye, M. N., Carella, A., Demadrille, R., & Simonato, J. P. (2017). All-polymeric flexible transparent heaters. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(32), 27250-27256.
108. Rus D., Tolley M. Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*. 2015. Vol. 521. P. 467–475. DOI:10.1038/nature14543.
109. Wang S., Xu J., Wang W. et al. Skin electronics from scalable fabrication of an intrinsically stretchable transistor array. *Nature*. 2018. Vol. 555. P. 83–88. [DOI: 10.1038/nature25494](https://doi.org/10.1038/nature25494)
110. Patil J. J., Chae W. H., Trebach A., Carter K. J., Lee E., Sannicolo T., Grossman J. C. Failing Forward: Stability of Transparent Electrodes Based on

- Metal Nanowire Networks. *Advanced Materials*. 2020. Vol. 33. 2004356. DOI:10.1002/adma.202004356.
111. Liparoti S., Landi G., Sorrentino A., Speranza V., Cakmak M., Neitzert H. C. Flexible Poly(Amide-Imide)-Carbon Black Based Microheater with High-Temperature Capability and an Extremely Low Temperature Coefficient. *Advanced Electronic Materials*. 2016. Vol. 2. 1600126. DOI: 10.1002/aelm.201600126
112. Choi S., Lee H., Ghaffari R., Hyeon T., Kim D.-H. Recent Advances in Flexible and Stretchable Bio-Electronic Devices Integrated with Nanomaterials. *Advanced Materials*. 2016. Vol. 28. P. 4203–4218. DOI:10.1002/adma.201504150.
113. Someya T., Bao Z., Malliaras G. G. The rise of plastic bioelectronics. *Nature*. 2016. Vol. 540. P. 379–385. 27974769. DOI: 10.1038/nature21004.
114. Lee J., Kim D., Sul H., Ko S. H. Thermo-Haptic Materials and Devices for Wearable Virtual and Augmented Reality. *Advanced Functional Materials*. 2020. Vol. 31. 2007376. DOI:10.1002/adfm.202007376.
115. Chu H., Zhang Z., Liu Y., Leng J. Self-heating fiber reinforced polymer composite using meso/macropore carbon nanotube paper and its application in deicing. *Carbon*. 2014. Vol. 66. P. 154–163. DOI:10.1016/J.CARBON.2013.08.053.
116. Lordan D., Burke M., Manning M., Martin A., Amann A., O'Connell D., Murphy R., Lyons C., Quinn A. J. Asymmetric Pentagonal Metal Meshes for Flexible Transparent Electrodes and Heaters. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017. Vol. 9. P. 4932–4940. DOI: 10.1021/acsami.6b12995.
117. Wang L., Luo J., Chen Y., Lin L., Huang X., Xue H., Gao J. Fluorine-free Superhydrophobic and Conductive Rubber Composite with Outstanding Deicing Performance for Highly Sensitive and Stretchable Strain Sensors. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2019. Vol. 11. P. 17774–17783. DOI:10.1021/acsami.9b03545.

118. Luong D. X., Yang K., Yoon J., Singh S. P., Wang T., Arnusch C. J., Tour J. M. Laser-Induced Graphene Composites as Multifunctional Surfaces. *ACS Nano*. 2019. Vol. 13. P. 2579–2586. DOI: 10.1021/acsnano.8b09626.
119. Ahmed A., Jalil M. A., Hossain M. M., Moniruzzaman M., Adak B., Islam M. T., Parvez M. S., Mukhopadhyay S. *Journal of Materials Chemistry C*. 2020. Vol. 8. P. 16204–16215. DOI: 10.1039/D0TC03368E.
120. Balandin A. A. Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials. *Nature Materials*. 2011. Vol. 10. P. 569–581. DOI: 10.1038/nmat3064.
121. Xia W., Fei X., Wang Q., Lu Y., Tendo Innocent M., Zhou J., Yu S., Xiang H., Zhu M. Nano-Hybridized Form-Stable Ester@F-SiO₂ Phase Change Materials for Melt-Spun PA6 Fibers Engineered towards Smart Thermal Management Fabrics. *Chemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 403. 126369. DOI: 10.1016/j.cej.2020.126369.
122. Choe A., Yeom J., Kwon Y., Lee Y., Shin Y.-E., Kim J., Ko H. Stimuli-responsive micro/nanoporous hairy skin for adaptive thermal insulation and infrared camouflage. *Materials Horizons*. 2020. Vol. 7. P. 3258–3265. DOI:10.1039/D0MH01405B.
123. Wang Y., Chen L., Cheng H., Wang B., Feng X., Mao Z., Sui X. Mechanically flexible, waterproof, breathable cellulose/polypyrrole/polyurethane composite aerogels as wearable heaters for personal thermal management. *Chemical Engineering Journal*. 2020. Vol. 402. 126222. DOI:10.1016/j.cej.2020.126222.
124. Wu K., Wang J., Liu D., Lei C., Liu D., Lei W., Fu Q. Highly Thermoconductive, Thermostable, and Super-Flexible Film by Engineering 1D Rigid Rod-Like Aramid Nanofiber/2D Boron Nitride Nanosheets. *Advanced Materials*. 2020. Vol. 32. 1906939. DOI: [10.1002/adma.201906939](https://doi.org/10.1002/adma.201906939).

125. Kim J., Campbell A. S., de Avila B. E., Wang J. Wearable Biosensors for Healthcare Monitoring. *Nature Biotechnology*. 2019. Vol. 37. P. 389–406. DOI: 10.1038/s41587-019-0045-y.
126. Trung T. Q., Lee N. E. Flexible and Stretchable Physical Sensor Integrated Platforms for Wearable Human-Activity Monitoring and Personal Healthcare. *Advanced Materials*. 2016. Vol. 28. P. 4338–4372. DOI: 10.1002/adma.201504244.
127. Shahzad F., Iqbal A., Kim H., Koo C. M. 2D Transition Metal Carbides (MXenes): Applications as an Electrically Conducting Material. *Advanced Materials*. 2020. Vol. 32. 2002159. DOI:10.1002/adma.202002159.
128. Kim B. S., Kim M. K., Cho Y., Hamed E. E., Gillette M. U., Cha H., Miljkovic N., Aakalu V. K., Kang K., Son K. N., Schachtschneider K. M., Schook L. B., Hu C., Popescu G., Park Y., Ballance W. C., Yu S., Im S. G., Lee J., Lee C. H., Kong H. Electrothermal soft manipulator enabling safe transport and handling of thin cell/tissue sheets and bioelectronic devices. *Science Advances*. 2020. Vol. 6 (42). 5630. DOI: 10.1126/sciadv.abc5630.
129. Wang X., Liu Z., Zhang T. Flexible Sensing Electronics for Wearable/Attachable Health Monitoring. *Small*. 2017. Vol. 13. 1602790. DOI:10.1002/smll.201602790.
130. Khan Y., Ostfeld A. E., Lochner C. M., Pierre A., Arias A. C. Monitoring of Vital Signs with Flexible and Wearable Medical Devices. *Advanced Materials*. 2016. Vol. 28. P. 4373–4395. DOI:10.1002/adma.201504366.
131. Zeng W., Shu L., Li Q., Chen S., Wang F., Tao X. M. Fiber-based wearable electronics: a review of materials, fabrication, devices, and applications. *Advanced Materials*. 2014. Vol. 26. P. 5310–5336. DOI: 10.1002/adma.201400633.
132. Ke Y., Chen J., Lin G., Wang S., Zhou Y., Yin J., Lee P. S., Long Y. Smart Windows: Electro-, Thermo-, Mechano-, Photochromics, and Beyond.

- Advanced Energy Materials*. 2019. Vol. 9. 1902066.
DOI: 10.1002/aenm.201902066.
133. Xu T., Ding Y., Liang Z., Sun H., Zheng F., Zhu Z., Zhao Y., Fong H. Threedimensional monolithic porous structures assembled from fragmented electrospun nanofiber mats/membranes: Methods, properties, and applications. *Progress in Materials Science*. 2020. Vol. 112. 100656. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.1006562020.
134. Rao K. D., Kulkarni G. U. A highly crystalline single Au wire network as a high temperature transparent heater. *Nanoscale*. 2014. Vol. 6. P. 5645–5651. DOI:10.1039/c4nr00869c.
135. Han Y., Zhong H., Liu N., Liu Y., Lin J., Jin P. In Situ Surface Oxidized Copper Mesh Electrodes for High-Performance Transparent Electrical Heating and Electromagnetic Interference Shielding. *Advanced Electronic Materials*. 2018. Vol. 4. 1800156. DOI:10.1002/aelm.201800156.
136. Huang X., Zhang F., Leng J. Metal mesh embedded in colorless shape memory polyimide for flexible transparent electric-heater and actuators. *Applied Materials Today*. 2020. Vol. 21. 100797. DOI: 10.1016/j.apmt.2020.100797.
137. Sánchez-Romate X. F., Sans A., Jiménez-Suárez A., Campo M., Ureña A, Prolongo SG. Highly Multifunctional GNP/Epoxy Nanocomposites: From Strain-Sensing to Joule Heating Applications. *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10. 2431. DOI: 10.3390/nano10122431.
138. Yoon S., Sim H. M., Cho S., Ko H., Park Y., Kim Y., Kim H. K. Highly stretchable, conductive polymer electrodes with a mixed AgPdCu and PTFE network interlayer for stretchable electronics. *Advanced Materials Interfaces*. 2021. Vol. 8. 2001500. DOI:10.1002/admi.202001500.
139. Azani M. R., Hassanpour A., Torres T. Benefits, Problems, and Solutions of Silver Nanowire Transparent Conductive Electrodes in Indium

- Tin Oxide (ITO)-Free Flexible Solar Cells. *Advanced Energy Materials*. 2020. Vol. 10. 2002536. DOI: 10.1002/aenm.202002536.
140. Wang T., Jing L. C., Zhu Q., Sagadevan Ethiraj A., Fan X., Liu H., Tian Y., Zhu Z., Meng Z., Geng H. Z. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2020. Vol. 577. P. 300–310. DOI:10.1016/j.jcis.2020.05.084.
141. Huang Y., Tao L. Q., Yu J., Wang Z., Zhu C., Chen X. Integrated Sensing and Warning Multifunctional Devices Based on the Combined Mechanical and Thermal Effect of Porous Graphene. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020. Vol. 12 (47). P. 53049–53057. DOI: 10.1021/acsami.0c13909.
142. Li Y., Feng S., Cao S., Zhang J., Kong D. Printable Liquid Metal Microparticle Ink for Ultrastretchable Electronics. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020. Vol. 12. P. 50852–50859. DOI: 10.1021/acsami.0c15084.
143. Cho S., Kang D. H., Lee H., Kim M. P., Kang S., Shanker R., Ko H. Highly Stretchable Sound-in-Display Electronics Based on Strain-Insensitive Metallic Nanonetworks. *Advanced Science*. 2020. Vol. 8. 2001647. DOI: 10.1002/advs.202001647.
144. Zhou J., Xu X., Xin Y., Lubineau G. Coaxial Thermoplastic Elastomer-Wrapped Carbon Nanotube Fibers for Deformable and Wearable Strain Sensors. *Advanced Functional Materials*. 2018. Vol. 28. 1705591. DOI: 10.1002/adfm.201705591.
145. Gupta R., Rao K. D., Kiruthika S., Kulkarni G. U. Visibly Transparent Heaters. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2016. Vol. 8. P. 12559–12575. DOI: 10.1021/acsami.5b11026.
146. Janas D., Koziol K. K. A review of production methods of carbon nanotube and graphene thin films for electrothermal applications. *Nanoscale*. 2014. Vol. 6. 3037. DOI: 10.1039/c3nr05636h.
147. Kaikanov M., Amanzhulov B., Demeuova G., Akhtanova G., Bozheyev F., Kemelbay A., Tikhonov A. Modification of silver nanowire

- coatings with intense pulsed ion beam for transparent heaters. *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10. 2153. DOI: 10.3390/nano10112153.
148. Kim H.-J., Kim J., Kim Y. A Fluoropolymer-Coated Nanometer-Thick Cu Mesh Film for a Robust and Hydrophobic Transparent Heater. *ACS Applied Nano Materials*. 2020. Vol. 3. P. 8672–8678. DOI: 10.1021/acsanm.0c01404.
149. Golan G., Axelevitch A., Sigalov B., Gorenstein B. Integrated thin film heater-thermocouple systems. *Microelectronics Reliability*. 2003. Vol. 43. P. 509–512. DOI:10.1016/S0026-2714(02)00320-7.
150. Chung G.-S. The fabrication of micro-heaters with low-power consumption using SOI and trench structures. *Metals and Materials International*. 2002. Vol. 8 (4). P. 347–351. DOI:10.1007/BF03186106.
151. Ji X., Liu W., Yin Y., Wang C., Torrisi F. A graphene-based electro-thermochromic textile display. *Journal of Materials Chemistry C*. 2020. Vol. 8. P. 15788–15794. DOI:10.1039/D0TC03144E.
152. Hatakeyama K., Ishikawa Y., Kirihara K., Ito T., Mayumi K., Ito K., Terashima K., Hakuta Y., Shimizu Y. Slide-Ring Material/Highly Dispersed Graphene Oxide Composite with Mechanical Strength and Tunable Electrical Conduction as a Stretchable-Base Substrate. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020. Vol. 12. P. 47911–47920. DOI:10.1021/acsami.0c12687.
153. Ba H., Truong-Phuoc L., Papaefthimiou V., Sutter C., Pronkin S., Bahouka A., Lafue Y., Nguyen-Dinh L., Giambastiani G., Pham-Huu C. Cotton fabrics coated with few-layer graphene as highly responsive surface heaters and integrated lightweight electronic-textile circuits. *ACS Applied Nano Materials*. 2020. Vol. 3. P. 9771–9783. DOI: 10.1021/acsanm.0c01861.
154. Jin I. S., Choi J., Jung J. W. Silver-Nanowire-Embedded Photopolymer Films for Transparent Film Heaters with Ultra-Flexibility, Quick Thermal Response, and Mechanical Reliability. *Advanced Electronic Materials*. 2020. Vol. 7 (2). 2000698. DOI: 10.1002/aelm.202000698.

155. Zhou B., Su M., Yang D., Han G., Feng Y., Wang B., Ma J., Ma J., Liu C., Shen C. Flexible MXene/Silver Nanowire-Based Transparent Conductive Film with Electromagnetic Interference Shielding and Electro-Photo-Thermal Performance. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020. Vol. 12 (36). P. 40859–40869. DOI: 10.1021/acsami.0c09020.
156. Yang Z., Wang W., Bi L., Chen L., Wang G., Chen G., Ye C., Pan J. Wearable electronics for heating and sensing based on a multifunctional PET/silver nanowire/PDMS yarn. *Nanoscale*. 2020. Vol. 12. P. 16562–16569. DOI: 10.1039/D0NR04023A.
157. Bok S., Ahn K., Oh H., Kwon N., Lee J. H., Nam J., Lim B. Solution-Processable Transparent Organic Molecular Nanoadhesives for Exceptionally Durable Nanowire Electrodes. *Advanced Electronic Materials*. 2020. Vol. 6. 1901440. DOI:10.1002/aelm.201901440.
158. Kang J., Kim H., Kim K. S., Lee S. K., Bae S., Ahn J. H., Kim Y. J., Choi J. B., Hong B. H. High-performance graphene-based transparent flexible heaters. *Nano Letters*. 2011. Vol. 11. P. 5154–5158. DOI: 10.1021/nl202311v.
159. Park T. H., Yu S., Koo M., Kim H., Kim E. H., Park J. E., Ok B., Kim B., Noh S. H., Park C., Kim E., Koo C. M., Park C. Shape-Adaptable 2D Titanium Carbide (MXene) Heater. *ACS Nano*. 2019. Vol. 13 (6). P. 6835–6844. DOI: 10.1021/acsnano.9b01602.
160. Jiang S., Guo W., Liu S., Huang X., Li Y., Li Z., Wu H., Yin Z. Grab and Heat: Highly Responsive and Shape Adaptive Soft Robotic Heaters for Effective Heating of Objects of Three-Dimensional Curvilinear Surfaces. *Applied Materials & Interfaces*. 2019. Vol. 11. P. 47476–47484. DOI: 10.1021/acsami.9b19889.
161. Zhou B., Zhang Z., Li Y., Han G., Feng Y., Wang B., Zhang D., Ma J., Liu C. Flexible, robust, and multifunctional electromagnetic interference shielding film with alternating cellulose nanofiber and MXene layers. *ACS*

- Applied Materials & Interfaces*. 2020. Vol. 12 (4). P. 4895–4905.
DOI: 10.1021/acsami.9b19768.
162. Qiu K., Elhassan A., Tian T., Yin X., Yu J., Li Z., Ding B. Highly Flexible, Efficient, and Sandwich-Structured Infrared Radiation Heating Fabric. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020. Vol. 12. P. 11016–11025.
DOI: 10.1021/acsami.9b23099.
163. Zhang L., Baima M., Andrew T. L. Transforming Commercial Textiles and Threads into Sewable and Weavable Electric Heaters. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017. Vol. 9 (37). P. 32299–32307.
DOI: 10.1021/acsami.7b10514.
164. Kim H.-J., Choi D.-I., Lee S., Sung S.-K., Kang D.-H., Kim, Y. Kim J. Quick Thermal Response-Transparent-Wearable Heater Based on Copper Mesh/Poly(Vinyl Alcohol) Film. *Advanced Engineering Materials*. 2021. Vol. 23 (10). 2100395. DOI:10.1002/adem.202100395.
165. Park E.-S. Resistivity and Thermal Reproducibility of the Carbon Black and SnO₂/Sb Coated Titanium Dioxide Filled Silicone Rubber Heaters. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2005. Vol. 290 (12). P. 1213–1219. DOI: 10.1002/mame.200500214.
166. Tian B., Liu Q., Luo C., Feng Y., Wu W. Multifunctional Ultrastretchable Printed Soft Electronic Devices for Wearable Applications. *Advanced Electronic Materials*. 2019. Vol. 6. 1900922. DOI:10.1002/aelm.201900922.
167. Huang J., Xu Z., Qiu W., Chen F., Meng Z., Hou C., Guo W., Liu X. Y. Stretchable and Heat-Resistant Protein-Based Electronic Skin for Human Thermoregulation. *Advanced Functional Materials*. 2020. Vol. 30 (13). 1910547. DOI:10.1002/adfm.201910547.
168. Wang R., Xu Z., Zhuang J., Liu Z., Peng L., Li Z., Liu Y., Gao W., Gao C. Highly Stretchable Graphene Fibers with Ultrafast Electrothermal

- Response for Low-Voltage Wearable Heaters. *Advanced Electronic Materials*. 2017. Vol. 3 (2). 1600425. DOI:10.1002/aelm.201600425.
169. Souri H., Bhattacharyya D. Highly Stretchable Multifunctional Wearable Devices Based on Conductive Cotton and Wool Fabrics. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2018. Vol. 10 (24). P. 20845–20853. DOI:10.1021/acsami.8b04775.
170. Su X., Li H., Lai X., Zheng L., Chen Z., Zeng S., Shen K., Sun L., Zeng X. Bioinspired superhydrophobic thermochromic films with robust healability. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020. Vol. 12. P. 14578–14587. DOI: 10.1021/acsami.0c00344.
171. Zhou R., Li P., Fan Z., Du D., Ouyang J. Stretchable Heaters with Composites of an Intrinsically Conductive Polymer, Reduced Graphene Oxide and an Elastomer for Wearable Thermotherapy. *Journal of Materials Chemistry C*. 2017. Vol. 5. 1544–1551. DOI: 10.1039/C6TC04849H.
172. Hong S., Lee H., Lee J., Kwon J., Han S., Suh Y. D., Cho H., Shin J., Yeo J., Ko S. H. Highly stretchable and transparent metal nanowire heater for wearable electronics applications. *Advanced Materials*. 2015. Vol. 27 (32). P. 4744–4751. DOI: 10.1002/adma.201500917.
173. Hwang B.-Y., Choi S.-H., Lee K.-W., Kim J.-Y. Highly stretchable and transparent electrode film based on SWCNT/Silver nanowire hybrid nanocomposite. *Composites Part B*. 2018. Vol. 151. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.06.004.
174. Sun W.-J., Xu L., Jia L.-C., Zhou C.-G., Xiang Y., Yin R.-H., Yan D.-X., Tang J.-H., Li Z.-M. Highly conductive and stretchable carbon nanotube/thermoplastic polyurethane composite for wearable heater. *Composites Science and Technology*. 2019. Vol. 181. 107695. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107695.
175. Wang F., Wang W., Mu X., Mao J. Anisotropic Conductive, Tough and Stretchable Heater Based on Nacre-like Crumpled Graphene Composite.

- Chemical Engineering Journal*. 2020. Vol. 395. 125183.
DOI:10.1016/j.cej.2020.125183.
176. Ma R., Kang B., Cho S., Choi M., Baik S. *ACS Nano*. 2015. Vol. 9 (11).
P. 10876–10886. DOI: 10.1021/acsnano.5b03864.
177. Jang N. S., Kim K. H., Ha S. H., Jung S. H., Lee H. M., Kim J. M.
Simple Approach to High-Performance Stretchable Heaters Based on
Kirigami Patterning of Conductive Paper for Wearable Thermotherapy
Applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017. Vol. 9 (23).
P. 19612. DOI: 10.1021/acsaami.7b03474.
178. Zhou J., Tian G., Jin G., Xin Y., Tao R., Lubineau G. Buckled
conductive polymer ribbons in elastomer channels as stretchable fiber
conductor. *Advanced Functional Materials*. 2019. Vol. 30 (5). 1907316.
DOI:10.1002/adfm.201907316.
179. Liu P., Li Y., Xu Y., Bao L., Wang L., Pan J., Zhang Z., Sun X., Peng H.
Stretchable and Energy-Efficient Heating Carbon Nanotube Fiber by
Designing a Hierarchically Helical Structure. *Small*. 2018. Vol. 14 (4).
1702926. DOI:10.1002/sml.201702926.
180. Zhou J., Mülle M., Zhang Y., Xu X., Li E. Q., Han F., Thoroddsen S. T.,
Lubineau G. High-ampacity conductive polymer microfibers as fast response
wearable heaters and electromechanical actuators. *Journal of Materials
Chemistry C*. 2016. Vol. 4. 1238. DOI:10.1039/C5TC03380B.
181. Huang H., He P., Huang T., Hu S., Xu T., Gu H., Yang S., Song L., Xie
X., Ding G. Electrochemical Strategy for Flexible and Highly Conductive
Carbon Films: The Role of 3-Dimensional Graphene/Graphite Aggregates.
ACS Applied Materials & Interfaces. 2019. Vol. 11. P. 1239–1246.
DOI: 10.1021/acsaami.8b17060.
182. Li C., Xu Y. T., Zhao B., Jiang L., Chen S.G., Xu J.B., Fu X.Z., Sun R.,
Wong C.P. Flexible graphene electrothermal films made from

- electrochemically exfoliated graphite. *Journal of Materials Science*. 2015. Vol. 51 (2). P. 1043–1051. DOI:10.1007/s10853-015-9434-x.
183. Hazarika A., Deka B. K., Jeong C., Park Y. B., Park H. W. Biomechanical Energy-Harvesting Wearable Textile-Based Personal Thermal Management Device Containing Epitaxially Grown Aligned Ag-Tipped-Ni_xCo_{1-x}Se Nanowires/Reduced Graphene Oxide. *Advanced Functional Materials*. 2019. Vol. 29. 1903144. DOI: 10.1002/adfm.201903144.
184. Zhao M., Li D., Huang J., Wang D., Mensah A., Wei Q. A multifunctional and highly stretchable electronic device based on silver nanowire/wrap yarn composite for a wearable strain sensor and heater. *Journal of Materials Chemistry C*. 2019. Vol. 7 (43). P. 13468–13476. DOI:10.1039/c9tc04252k.
185. Choi S., Park J., Hyun W., Kim J., Kim J., Lee Y. B., Song C., Hwang H. J., Kim J. H., Hyeon T., Kim D. H. Stretchable Heater Using Ligand-Exchanged Silver Nanowire Nanocomposite for Wearable Articular Thermo-therapy. *ACS Nano*. 2015. Vol. 9 (6). P. 6626–6633. DOI: 10.1021/acsnano.5b02790.
186. Datta M., Whaley R. D., Dagenais M. Design and fabrication of thin film resistive heaters for hybrid optoelectronic packaging. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*. 2002. Vol. 25. P. 495–502. DOI:10.1109/TADVP.2002.807605.
187. Khang D.Y., Jiang H., Huang Y., Rogers J.A. A stretchable form of single-crystal silicon for high-performance electronics on rubber substrates. *Science*. 2006. Vol. 311. P. 208–212. DOI: 10.1126/science.1121401.
188. Zhou H., Zhang Z., Sun C., Deng H., Fu Q. Biomimetic Approach to Facilitate the High Filler Content in Free-Standing and Flexible Thermoelectric Polymer Composite Films Based on PVDF and Ag₂Se Nanowires. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020. Vol. 12. P. 51506–51516. DOI: 10.1021/acami.0c15414.

189. Echsler H., Hattendorf H., Singheiser L., Quadackers W. J. Oxidation behaviour of Fe-Cr-Al alloys during resistance and furnace heating. *Materials and Corrosion*. 2006. Vol. 57 (2). P. 115–121. DOI: 10.1002/maco.200503897.
190. Han D., Li Y., Jiang X., Zhao W., Wang F., Lan W., Xie E., Han W. A facile method to prepare transparent and stretchable epidermal thin film heaters. *Composites Science and Technology*. 2018. Vol. 168. P. 460–466. DOI:10.1016/j.compscitech.2018.10.028.
191. Yao S., Yang J., Poblete F.R., Hu X., Zhu Y. Multifunctional Electronic Textiles Using Silver Nanowire Composites. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2019. Vol. 11 (34). P. 31028–31037. DOI: 10.1021/acsami.9b07520.
192. Hong C. H., Oh S. K., Kim T. K., Cha Y. J., Kwak J. S., Shin J. H., Ju B. K., Cheong W. S. Electron beam irradiated silver nanowires for a highly transparent heater. *Scientific Reports*. 2015. Vol. 5. 17716. DOI: 10.1038/srep17716.
193. Lee J. M., Kim Y. H., Kim H. K., Kim H. J., Hong C. H. Effect of AlO_x protection layer on AgNWs for flexible transparent heater. *Scientific Reports*. 2020. Vol.10. 4592. DOI: 10.1038/s41598-020-61449-6.
194. Kim H., Lee H., Ha I., Jung J., Won P., Cho H., Yeo J., Hong S., Han S., Kwon J., K.-J. Cho K.-J., Ko S. H. Biomimetic Color Changing Anisotropic Soft Actuators with Integrated Metal Nanowire Percolation Network Transparent Heaters for Soft Robotics. *Advanced Functional Materials*. 2018. Vol. 28 (32). 1801847. DOI:10.1002/adfm.201801847.
195. Jang J., Hyun B., Ji S., E. Cho E., B. W. An B. W., Cheong W. H., Park J.-U. Rapid production of large-area, transparent and stretchable electrodes using metal nanofibers as wirelessly operated wearable heaters. *NPG Asia Mater* 2017. Vol. 9. 432. DOI:10.1038/am.2017.172.

196. Oh I.-K., Park J. S., Khan M. R., Kim K., Lee Z., Shong B., Lee H.-B.-R. Reaction mechanism of Pt atomic layer deposition on various textile surfaces. *Chemistry of Materials*. 2019. Vol. 31. P. 8995–9002. DOI:10.1021/acs.chemmater.9b03171.
197. Tian M., Hao Y., Qu L., Zhu S., Zhang X., Chen S. Enhanced electrothermal efficiency of flexible graphene fabric Joule heaters with the aid of graphene oxide. *Materials Letters*. 2019. Vol. 234. P. 101–104. DOI: 10.1016/j.matlet.2018.09.078.
198. Ilanchezhiyan P., Zakirov A. S., Kumar G. M., Yuldashev S. U., Cho H. D., Kang T. W., Mamadalimov A. T. Highly efficient CNT functionalized cotton fabrics for flexible/wearable heating applications. *RSC Advances*. 2015. Vol. 5. P. 10697–10702. DOI:10.1039/C4RA10667A.
199. Gogurla N., Kim Y., Cho S., Kim J., Kim S. Multifunctional and Ultrathin Electronic Tattoo for On-Skin Diagnostic and Therapeutic Applications. *Advanced Materials*. 2021. Vol. 33. 2008308. DOI: 10.1002/adma.202008308.
200. Kim G. H., Shao L., Zhang K., Pipe K. P. Engineered doping of organic semiconductors for enhanced thermoelectric efficiency. *Nature Materials*. 2013. Vol. 12. P. 719–723. DOI: 10.1038/nmat3635.
201. Kim O., Shin T. J., Park M. J. Fast low-voltage electroactive actuators using nanostructured polymer electrolytes. *Nature Communications*. 2013. Vol. 4. 2208. DOI: 10.1038/ncomms3208.
202. Miura H., Fukuyama Y., Sunda T., Lin B., Zhou J., Takizawa J., Ohmori A., Kimura M. Foldable Textile Electronic Devices Using All-Organic Conductive Fibers. *Advanced Engineering Materials*. 2014. Vol. 16. P. 550–555. DOI: 10.1002/adem.201300461.
203. Noriega R., Rivnay J., Vandewal K., Koch F. P., Stingelin N., Smith P., Toney M. F., Salleo A. A general relationship between disorder, aggregation

- and charge transport in conjugated polymers. *Nature Materials*. 2013. Vol. 12. P. 1038–1044. DOI: 10.1038/nmat3722.
204. Ouyang J., Xu Q., Chu C.-W., Yang Y., Li G., Shinar J. On the mechanism of conductivity enhancement in poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate) film through solvent treatment. *Polymer*. 2004. Vol. 45. P. 8443–8450. DOI: 10.1016/j.polymer.2004.10.001.
205. Yang Y., Deng H., Fu Q. Recent progress on PEDOT:PSS based polymer blends and composites for flexible electronics and thermoelectric devices. *Materials Chemistry Frontiers*. 2020. Vol. 4. P. 3130–3152. DOI:10.1039/D0QM00308E.
206. Fan B., Mei X., Ouyang J. Significant Conductivity Enhancement of Conductive Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):Poly(styrenesulfonate) Films by Adding Anionic Surfactants into Polymer Solution. *Macromolecules*. 2008. Vol. 41. P. 5971–5973. DOI:10.1021/ma8012459.
207. Ouyang J., Chu C. W., Chen F. C., Xu Q., Yang Y. High-Conductivity Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):Poly(styrene sulfonate) Film and Its Application in Polymer Optoelectronic Devices. *Advanced Functional Materials*. 2005. Vol. 15. P. 203–208. DOI: 10.1002/adfm.200400016.
208. Xia Y., Ouyang J. Anion effect on salt-induced conductivity enhancement of poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) films. *Organic Electronics*. 2010. Vol. 11. P. 1129–1135. DOI: 10.1016/j.orgel.2010.04.007.
209. Xia Y., Sun K., Ouyang J. Solution-processed metallic conducting polymer films as transparent electrode of optoelectronic devices. *Advanced Materials*. 2012. Vol. 24. P. 2436–2440. DOI: 10.1002/adma.201104795.
210. Gueye M. N., Carella A., Faure-Vincent J., Demadrille R., Simonato J.-P. Progress in understanding structure and transport properties of PEDOT-

- based materials: A critical review. *Progress in Materials Science*. 2020. Vol. 108. 100616. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2019.100616.
211. Zhou J., Fukawa T., Shirai H., Kimura M. Anisotropic Motion of Electroactive Papers Coated with PEDOT/PSS. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2010. Vol. 295. P. 671–675. DOI:10.1002/mame.201000013.
212. Maity S., Chatterjee A., Singh B., Pal Singh A. Polypyrrole based electro-conductive textiles for heat generation. *Journal of The Textile Institute*. 2014. Vol. 105 (8). P. 887–893. DOI: 10.1080/00405000.2013.861149.
213. Xie J., Pan W., Chen Y., Guo Z. Preparation of polypyrrole coated on Polyester Cleanroom Wiper as heater device. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2020. Vol. 15. DOI: 10.1177/1558925020925.
214. Pomfret S. J., Adams P. N., Comfort N. P., Monkman A. P. Electrical and mechanical properties of polyaniline fibres produced by a one-step wet spinning process. *Polymer*. 2000. Vol. 41 (6). P. 2265–2269. DOI: 10.1016/S0032-3861(99)00365-1.
215. Foroughi J., Spinks G. M., Wallace G. G. A reactive wet spinning approach to polypyrrole fibres. *Journal of Materials Chemistry*. 2011. Vol. 21. P. 6421–6426. DOI: 10.1039/C0JM04406G.
216. Jalili R., Razal J. M., Innis P. C., Wallace G. G. One-step wet-spinning process of poly(3,4-ethylenedioxythiophene): poly(styrenesulfonate) fibers and the origin of higher electrical conductivity. *Advanced Functional Materials*. 2011. Vol. 21 (17). P. 3363–3370. DOI: 10.1002/adfm.201100785.
217. Zhou J., Anjum D.H., Chen L., Xu X., Ventura I.A., Jiang L., Lubineau G. The temperature-dependent microstructure of PEDOT/PSS films: insights from morphological, mechanical and electrical analyses. *Journal of Materials Chemistry C*. 2014. Vol. 2. P. 9903–9910. DOI: 10.1039/C4TC01593B.

218. Hudaya C., Jeon B. J., Lee J. K. High thermal performance of SnO₂:F thin transparent heaters with scattered metal nanodots. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2015. Vol. 7 (1). P. 57–61. DOI: 10.1021/am507497u.
219. Roul M. K., Pradhan S. K., Song K. D., Bahoura M. J. RF magnetron-sputtered Al–ZnO/Ag/Al–ZnO (AAA) multilayer electrode for transparent and flexible thin-film heater. *Journal of Materials Science*. 2019. Vol. 54. P. 7062–7061. DOI: 10.1007/s10853-019-03376-0.
220. Wang Z., Li J., Xu J., Huang J., Yang Y., Tan R., Chen G., Fang X., Zhao Y., Song W. Robust ultrathin and transparent AZO/Ag-SnO_x/AZO on polyimide substrate for flexible thin film heater with temperature over 400 °C. *Journal of Materials Science & Technology*. 2020. Vol. 48. P. 156–162. DOI: 10.1016/j.jmst.2020.01.058.
221. Comini E., Baratto C., Faglia G., Ferroni M., Vomiero A., Sberveglieri G. Quasi-One Dimensional Metal Oxide Semiconductors: Preparation, Characterization and Application as Chemical Sensors. *Progress in Materials Science*. 2009. Vol. 54 (1). P. 1–67. DOI:10.1016/j.pmatsci.2008.06.003.
222. Hecht D. S., Hu L., Irvin G. ChemInform Abstract: Emerging Transparent Electrodes Based on Thin Films of Carbon Nanotubes, Graphene, and Metallic Nanostructures. *Advanced Materials*. 2011. Vol. 23 (13). P. 1482–1516. DOI: 10.1002/adma.201003188.
223. Im K., Cho K., Kim J., Kim S. Transparent heaters based on solution-processed indium tin oxide nanoparticles. *Thin Solid Films*. 2010. Vol. 518. P. 3960–3963. DOI: 10.1016/j.tsf.2009.10.164.
224. Lee D.-J., Kim H.-M., Kwon J.-Y., Choi H., Kim S.-H., Kim K.-B. Structural and Electrical Properties of Atomic Layer Deposited Al-Doped ZnO Films. *Advanced Functional Materials*. 2011. Vol. 21. P. 448–455. DOI: 10.1002/adfm.201001342.
225. Ravichandran K., Jabena Begum N., Swaminathan K., Sakthivel B. Fabrication of a double layered FTO/AZO film structure having enhanced

- thermal, electrical and optical properties, as a substitute for ITO films. *Superlattices and Microstructures*. 2013. Vol. 64. P. 185–195. DOI: 10.1016/j.spmi.2013.09.029.
226. Jeong G., Seo J., Kim Y., Seo D. H., Baik J. M., Jeon E. C., Lee G., Park H. Graphene Antiadhesion Layer for the Effective Peel-and-Pick Transfer of Metallic Electrodes toward Flexible Electronics. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021. Vol. 13. P. 22000–22008. DOI: 10.1021/acsami.1c03081.
227. Lai X., Guo R., Xiao H., Lan J., Jiang S., Cui C., Qin W. Flexible conductive copper/reduced graphene oxide coated PBO fibers modified with poly(dopamine). *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 788. P. 1169–1176. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.02.296.
228. Ahn J., Gu J., Hwang B., Kang H., Hwang S., Jeon S., Jeong J., Park I. Printed fabric heater based on Ag nanowire/carbon nanotube composites. *Nanotechnology*. 2019. Vol. 30 (45). 455707. DOI: 10.1088/1361-6528/ab35eb.
229. Im H., Jang E. Y., Choi A., Kim W. J., Kang T. J., Park Y. W., Kim Y. H. Enhancement of heating performance of carbon nanotube sheet with granular metal. *ACS Appl Mater Interfaces*. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2012. Vol. 4. P. 2338–2342. DOI: 10.1021/am300477u.
230. Zhang M., Wang C., Liang X., Yin Z., Xia K., Wang H., Jian M., Zhang Y. Weft-Knitted Fabric for a Highly Stretchable and Low-Voltage Wearable Heater. *Advanced Electronic Materials*. 2017. Vol. 3 (9). 1700193. DOI: 10.1002/aelm.201700193.
231. Tian T., Wei X., Elhassan A., Yu J., Li Z., Ding B. Highly flexible, efficient, and wearable infrared radiation heating carbon fabric. *Chemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 417. 128114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128114>.

232. Jang J., Zhou H., Lee J., Kim H., In J. B. Heat Scanning for the Fabrication of Conductive Fibers. *Polymers (Basel)*. 2021. Vol. 13 (9). 1405. DOI: 10.3390/polym13091405
233. Yoshikawa R., Tenjimbayashi M., Matsubayashi T., Manabe K., Magagnin L., Monnai Y., Shiratori S. Designing a flexible and transparent ultrarapid electrothermogenic film based on thermal loss suppression effect: a self-fused Cu/Ni composite junctionless nanonetwork for effective deicing heater. *ACS Applied Nano Materials*. 2018. Vol. 1 (2). P. 860–868. DOI: 10.1021/acsanm.7b00268.
234. Luo X., Weng W., Liang Y., Hu Z., Zhang Y., Yang J., Yang L., Yang S., Zhu M., Cheng H.-M. Multifunctional fabrics of carbon nanotube fibers. *Journal of Materials Chemistry A*. 2019. Vol. 7. P. 8790–8797. DOI: 10.1039/C9TA01474H.
235. Sadi M. S., Yang M., Luo L., Cheng D., Cai G., Wang X. Direct screen printing of single-faced conductive cotton fabrics for strain sensing, electrical heating and color changing. *Cellulose*. 2019. Vol. 26. P. 6179–6188. DOI: 10.1007/s10570-019-02526-6.
236. Hao Y., Tian M., Zhao H., Qu L., Zhu S., Zhang X., Chen S., Wang K., Ran J. High efficiency electro-thermal graphene/tourmaline composite fabric joule heater with durable abrasion resistance via spray coating route. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2018. Vol. 57. P. 13437–13448. DOI: 10.1021/acs.iecr.8b03628.
237. Chang H., Jia Y., Xiao L., Chen H., Zhao K., Chen Y., Ma Y. Three dimensional cross-linked and flexible graphene composite paper with ultrafast electrothermal response at ultra-low voltage. *Carbon*. 2019. Vol. 154. P. 150–155. DOI: 10.1016/j.carbon.2019.08.008.
238. Walia S., Gupta R., Rao K. D., Kulkarni G. U. Transparent Pd Wire Network-Based Areal Hydrogen Sensor with Inherent Joule Heater. *ACS*

- Applied Materials & Interfaces*. 2016. Vol. 8. P. 23419–23424.
DOI: 10.1021/acsami.6b08275.
239. Veeramuthu L., Chen B. Y., Tsai C. Y., Liang F. C., Venkatesan M., Jiang D. H., Chen C. W., Cai X., Kuo C. C. Novel stretchable thermochromic transparent heaters designed for smart window defroster applications by spray coating silver nanowire. *RSC Advances*. 2019. Vol. 9 (61). P. 35786–35796.
DOI: 10.1039/c9ra06508c.
240. Yao S., Cui J., Cui Z., Zhu Y. Soft electrothermal actuators using silver nanowire heaters. *Nanoscale*. 2017. Vol. 9. P. 3797–3805.
DOI: 10.1039/c6nr09270e.
241. Lee K., Park J., Kim H., Park H.-S., Song H.-K., Kim K.-H., Seo K. High-performance electrothermal and anticorrosive transparent heating stickers. *Journal of Materials Chemistry A*. 2018. Vol. 6. P. 11790–11796.
DOI: 10.1039/C8TA02313A.
242. Kang T. W., Kim S. H., Kim C. H., Lee S. M., Kim H. K., Park J. S., Lee J. H., Yang Y. S., Lee S. J. Flexible Polymer/Metal/Polymer and Polymer/Metal/Inorganic Trilayer Transparent Conducting Thin Film Heaters with Highly Hydrophobic Surface. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017. Vol. 9 (38). P. 33129–33136. DOI: 10.1021/acsami.7b09837.
243. Amjadi M., Sitti M. High-Performance Multiresponsive Paper Actuators. *ACS Nano*. 2016. Vol. 10 (11). P. 10202–10210.
DOI: 10.1021/acs.nano.6b05545.
244. Saito M., Kanai E., Fujita H., Aso T., Matsutani N., Fujie T. Flexible Induction Heater Based on the Polymeric Thin Film for Local Thermotherapy. *Advanced Functional Materials*. 2021. Vol. 31 (32). 2102444.
DOI: 10.1002/adfm.202102444.
245. Yu C., O'Brien K., Zhang Y.-H., Yu H., Jiang H. Tunable optical gratings based on buckled nanoscale thin films on transparent elastomeric

- substrates. *Applied Physics Letters*. 2010. Vol. 96 (104). 41111. DOI: 10.1063/1.3298744.
246. Stafford C. M., Guo S., Harrison C., Chiang M. Y. M. Combinatorial and HighThroughput Measurements of the Modulus of Thin Polymer Films. *Review of Scientific Instruments*. 2005. Vol. 76 (6). 62207. DOI: 10.1063/1.1906085.
247. Chen Y. C., Crosby A. J. High aspect ratio wrinkles via substrate prestretch. *Advanced Materials*. 2014. Vol. 26 (32). P. 5626–5631. DOI: 10.1002/adma.201401444.
248. Zheng L., Zhu M., Wu B., Li Z., Sun S., Wu P. Conductance-stable liquid metal sheath-core microfibers for stretchy smart fabrics and self-powered sensing. *Science Advances*. 2021. Vol. 7(22). DOI:10.1126/sciadv.abg4041.
- Li W., Yarali E., Bakytbekov A., Anthopoulos T. D., Shamim A. Highly transparent and conductive electrodes enabled by scalable printing-and-sintering of silver nanowires. *Nanotechnology*. 2020. Vol. 31. 395201. DOI 10.1088/1361-6528/ab9c53.
249. ДСТУ ISO 3233-1:2022. Фарби та лаки. Визначення об'ємної частки нелетких речовин. Чинний від 2023-06-01. Вид. офіц. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=99356 (дата звернення: 23.04.2024).
250. ДСТУ ISO 3233-2:2020. Фарби та лаки. Визначення об'ємної частки нелетких речовин. Частина 2. Метод з використанням визначення вмісту нелетких речовин згідно з ISO 3251 та густини сухої плівки за законом Архімеда з використанням тестових пластин з покриттям (ISO 3233-2:2019, IDT). Чинний від 2020-07-01. Вид. офіц. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=90166 (дата звернення: 23.04.2024).

251. ДСТУ ISO 2808:2019. Фарби та лаки. Визначення товщини плівки (ISO 2808:2019, IDT). Чинний від 2021-01-01. Вид. офіц. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=89222 (дата звернення: 23.04.2024).
252. ДСТУ ISO 1524:2015. Фарби, лаки та поліграфічні фарби. Визначення ступеня перетирання (ISO 1524:2013, IDT). Чинний від 2021-09-01. Вид. офіц. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=90304 (дата звернення: 23.04.2024).
253. ДСТУ ISO 2431:2015. Фарби та лаки. Визначення часу витікання з використанням лійок (ISO 2431:2011, IDT). Недіючий від 2024-01-01. Вид. офіц. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=65439. (дата звернення: 23.04.2024).
254. ДСТУ ISO 2884-2:2015. Фарби та лаки. Визначення в'язкості із використанням ротаційного віскозиметра. Частина 2. Дисковий або кульковий віскозиметр, що працює із заданою швидкістю (ISO 2884-2:2003, IDT). Чинний від 2016-01-01. Вид. офіц. URL: https://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page.html?id_doc=78964 (дата звернення: 23.04.2024).
255. Свістільнік Р. Ф., Федорів Т. Р., Савченко Б. М., Осауленко С. І. Розробка технології електропровідних гібридних композиційних покриттів. *Технології та інжиніринг*. № 4. С. 60–70. DOI: 10.30857/2786-5371.2022.4.5.
256. Свістільнік Р. Ф., Федорів Т. Р. Вплив полімерних матриць на електричні властивості композитних покриттів. *Технології та інжиніринг*. 2023. № 5. С. 115–122. DOI: 10.30857/2786-5371.2023.5.10
257. Свістільнік Р. Ф., Патлун Д. В. Дослідження впливу температури на електропровідні властивості полімерних композитних покриттів. *Технології та інжиніринг*. 2023. № 6. С. 101–109. DOI: 10.30857/2786-5371.2023.6.8.

ДОДАТКИ

Додаток А

ЗАТВЕРДЖЕНО

Директор ТОВ «Спектрум Пекіджінг»

Дубина А.В.

« 14 » квітня 2024 р.

АКТ

Про виготовлення зразків нагрівальних елементів шляхом друку

На виробничих потужностях «Спектрум Пекіджінг» за участю аспіранта Свістільніка Р.Ф. та проф. Савченко Б.М. було виготовлено зразки плівкових нагрівальних елементів з використанням електропровідного композитного розчину (фарби), котра виготовлена в КНУТД .

Процес виробництва здійснювався на друкарській машині виробництва Туреччини , ламінація здійснювалась на ламінації SOMA.

Технологічні режими та параметри виробництва плівкового нагрівального елемента відпрацьовані сумісно з колективом підприємства. Друк зразків здійснювався при стабільних технологічних режимах. Процес виробництва плівкового нагрівального елемента може бути рекомендований до впровадження.

Склад та технологічні параметри виробництва зразка плівкового нагрівального елемента наведені в додатку 1 та у таблиці 1, 2, стор. 1, основні характеристики електропровідного полімерного розчину у додатку 1 таблиця 2, стор. 1.

Додаток 1: Таблиця 1, 2, 3, на 1 сторінці



д.т.н., проф. Савченко Б.М.

асп. Свістільнік Р.Ф.

Директор

Технолог

Додаток А

Додаток

до акту про виготовлення зразків нагрівальних елементів шляхом друку

Таблиця 1

Рецептурний склад електропровідного композитного полімерного розчину

№	Склад сухого залишку	Вміст компоненту мас., %
1	ПВБ SDW-3A	29
2	Графіт C0	60
3	Технічний вуглець XC72	10
4	Dynasylan AMEO	1
5	Розчинник - ізопропіловий спирт	60

Таблиця 2

Технологічні параметри друку

№	Параметр	Значення
1	В'язкість, С	20-21
2	Щільність нанесення, г/м ²	110
3	Швидкість друку, м/хв	50
4	Швидкість ламінування, м/хв	20
5	Сухий залишок, %	40
6	Температура сушки °С	40

Таблиця 3

Характеристики нагрівального елемента

№	Параметр	Значення
1	Товщина, μ	50
2	Площина, м ²	1
3	Питомий об'ємний опір, $\Omega \cdot \text{см}$	0,221
4	Питомий поверхневий опір, $\Omega \square$	44,150
5	Питома потужність, Вт/ м ²	14,4/57,6
6	Напруга, В	12/24



Додаток Б

ЗАТВЕРДЖЕНО

Директор

ТОВ «АЙ ДАБЛ-Ю ХОУМ»



«18» жовтня 2023 р.

АКТ

Про застосування композитного електропровідного покриття під час виробництва макетів бойової техніки

Ми нижче згадані: директор ТОВ «АЙ ДАБЛ-Ю ХОУМ» Аврамчук Н.П. д.т.н. проф. Савченко Б.М., асп. Свістільнік Р.Ф. склали цей акт в тому що електропровідний композитний розчин виготовлений в КНУТД було успішно використано для створення композитного покриття макетів бойової техніки

Для аплікації електропровідного полімерного розчину було використано пульверизатор на стисненому повітрі. Композитне покриття наносилось у 2 шари. Композитне покриття мало достатню адгезію до субстрату та забезпечувало адгезію до зовнішнього покриття.

Аплікація здійснювалась в стабільних технологічних режимах, процес виробництва композитного електропровідного покриття може бути рекомендований на впровадження у виробничу програму підприємства.

Склад композитного електропровідного покриття та технологічні параметри аплікації наведені в додатку 1 та у таблиці 1, 2, стор. 1, стор. 1. Основні характеристики та параметри аплікації у додатку 1 табл.3

Додаток А: Таблиця 1, 2, 3, на 1 сторінці

Handwritten signature of B.M. Savchenko written over a horizontal line.

д.т.н., проф. Савченко Б.М.

асп. Свістільнік Р.Ф.

Директор

Додаток Б

Таблиця 1

Рецептурний склад електропровідного композитного полімерного розчину

№	Склад	Вміст компоненту мас. %
1	ПВБ	20
2	Графіт С0	58
3	Сажа ХС72	20
4	Дунасулан АМЕО	2
5	Розчинник - ізопропіловий спирт	60

Таблиця 2

Технологічні параметри нанесення

№	Параметр	Значення
1	В'язкість електропровідної полімерної суміші, С	5-10
2	Щільність нанесення, г/м ²	110
3	Кількість шарів	2

Таблиця 3

Характеристики композитного електропровідного покриття

№	Параметр	Значення
1	Товщина, μ	75-80
2	Питомий об'ємний опір, $\Omega \cdot \text{см}$	0,10
3	Питомий поверхневий опір, $\Omega \square$	10-15

Додаток В



МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ
УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ
ІНСТИТУТ ВИПРОБУВАНЬ І
СЕРТИФІКАЦІЇ ОЗБРОЄННЯ ТА
ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

Код ЄДРПОУ 240201463-132
"21" "03" 2024 року

№ 1384
18003, м. Черкаси

Ректору Київського національного
університету технологій та дизайну,
академіку НАПН Івану ГРИЩЕНКУ
вул. Мала Шияновська (Немировича-
Данченка), 2, м. Київ, Україна, 01011
knutd@knutd.edu.ua


Шановний Іване Михайловичу!

За результатами дослідницьких випробувань направляю Вам Ак дослідницьких випробувань елементів спеціального багатоспектрального маскувального комплекту, Частина І (шифр "Панор", тема № 240201463-132 затверджений 09.03.2024 начальником Центрального військово-наукового управління Генерального штабу Збройних Сил України.

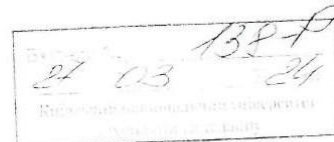
Додаток: Акт дослідницьких випробувань елементів спеціального багатоспектрального маскувального комплекту, шифр "Панор" тема № 240201463-132, 1 прим. на 46 арк., не таємно, тільки адресату.

З повагою,

Начальник Державного науково-дослідного інституту
випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки
полковник

 Геннадій ПІВЦОВ

Виконавеш Костянтин Кондратюк +38(097)3369536



Додаток Г

ЗАТВЕРДЖЕНО



Проректор наукової та інноваційної діяльності

Людмила ГАНУЦАК-ЄФІМЕНКО

_____ 2024 р.

АКТ

впровадження у навчальний процес і освітньо-наукову діяльність
результатів дисертаційної роботи
Свістільника Романа Федоровича

Даний акт складено про те, що результати дисертаційної роботи Свістільника Р.Ф. впроваджено в навчальний процес і освітньо-наукову діяльність кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження КНУТД. Зокрема:

1. Використано при підготовці курсів лекцій, матеріалів практичних і лабораторних занять за дисциплінами:
 - Технологія та устаткування переробки полімерів (викладається для бакалаврів спеціальності 161 – Хімічні технології та інженерія)
 - Функціональні полімерні композити (викладається для магістрів спеціальності 161 – Хімічні технології та інженерія).
2. Результати науково-дослідної роботи використано при підготовці кваліфікаційних робіт магістрів:
 - 1) Федорів Тарас Романович гр. МгПП-19 на тему «Удосконалення технології одержання антистатичних полімерних матеріалів» (науковий керівник проф. Савченко Б.М.);
 - 2) Новицький Станіслав Сергійович. МгПП-21 на тему: «Розробка технології отримання високонаповнених композитів на основі поліолефінів» (науковий керівник проф. Савченко Б.М.)

Зав. кафедри хімічних технологій
та ресурсозбереження,
д.т.н., проф.

Вікторія ПЛАВАН