

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

Кафедра медичної радіофізики

«На правах рукопису»

Робота допущена до захисту в ЕК
рішенням кафедри медичної радіофізики
від _____ 2024 року, протокол № ____.
Завідувач кафедри кандидат фіз.-мат. наук, доцент
_____ Сергій РАДЧЕНКО

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему:

**«ТОНКОПЛІВКОВІ КОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ
ПОЛІВІНІЛХЛОРИД/АКТИВОВАНЕ ВУГІЛЛЯ: ОТРИМАННЯ ТА
МІКРОХВИЛЬОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ»**

Виконав:

студент 2-го курсу магістратури
денної форми навчання
спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали
ОНП «Біомедична фізика, інженерія та інформатика»
Зайченко Олексій Сергійович _____

Науковий керівник:

кандидат хім. наук, с.н.с.
Гріщенко Людмила Миколаївна _____

Рецензент:

кандидат хім. наук, с.н.с.
Пермякова Наталія Михайлівна _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент _____ Олексій ЗАЙЧЕНКО

Київ - 2024

Зміст

| | |
|--|----|
| Список скорочень | 4 |
| Реферат..... | 5 |
| Вступ | 6 |
| Розділ 1. Огляд літератури..... | 7 |
| 1.1 Композити на основі полімерів та вуглецевмісних наповнювачів..... | 7 |
| 1.2 Короткий огляд історії вивчення композитів. | 7 |
| 1.3 Загальна визначення та основні характеристики ПВХ та активованого вугілля | 8 |
| 1.4 Практичні застосування композитів на основі ПВХ та активованого вугілля в різних галузях. | 9 |
| 1.5 Сучасні технології виготовлення композитів. | 10 |
| 1.5.1 Радикальна полімеризація..... | 12 |
| 1.5.2 Іонна полімеризація..... | 13 |
| 1.5.3 Каталізована полімеризація | 14 |
| 1.5.4 Адиційна полімеризація..... | 15 |
| 1.5.5 Конденсаційна полімеризація..... | 15 |
| 1.5.6 Композитування..... | 16 |
| 1.6 Мікрохвильові властивості композитних матеріалів з вуглецевмісними наповнювачами | 17 |
| Розділ 2. Методики отримання композитів та методи досліджень | 22 |
| 2.1 Вихідні матеріали | 22 |
| 2.1.2 Отримання композитних плівок..... | 22 |
| 2.2 Методи досліджень..... | 23 |
| 2.2.1 Скануюча електронна мікроскопія | 23 |
| 2.2.2 Трансмісійна електронна мікроскопія..... | 23 |
| 2.2.3 Термогравіметричний аналіз | 24 |
| 2.2.4 Термопрограмована десорбційна мас-спектрометрія..... | 25 |
| 2.2.5 ІЧ- Фур'є спектроскопія | 26 |
| Розділ 3. Результати досліджень зразків композитних матеріалів..... | 27 |
| 3.1. Результати досліджень композитів методами ТЕМ та СЕМ. | 27 |
| 3.2. Результати досліджень композитів методами ТПДМС та ТГА..... | 30 |
| 3.3. Результати досліджень композитів методом ІЧ-Фур'є спектроскопії..... | 33 |
| 3.4. Мікрохвильові властивості композитів..... | 34 |
| Висновки..... | 37 |

Список використаних джерел..... 39

Список скорочень

Полівінілхлорид (ПВХ)

Активоване вугілля (АВ)

Вуглецевий матеріал (ВМ)

Вуглецеве волокно (ВВ)

Поліетилен (ПЕ)

Полістирол (ПС)

Поліпропілен (ПП)

Поліуретан (ПУ)

Поліетилентерефталат (ПЕТ)

Поліакрилонітрил (ПАН)

Полівінілпіролідон (ПВП)

Полікарбонат (ПК)

Поліетиленфталат (ПЕН)

Надвисокі частоти (НВЧ)

Кісточкове активоване вугілля (КАВ)

Скануюча електронна мікроскопія (СЕМ)

Енергетично-дисперсійний рентгенівський аналіз (EDX)

Трансмісійна електронна мікроскопія (ТЕМ)

Термогравіметричний аналіз (ТГА)

Термопрограмована десорбційна мас-спектрометрія (ТПДМС)

ІЧ -Фур'є спектроскопія (FTIR)

Потенціометричне титрування (ПТ)

Реферат

Диплом – 42 с., 5 зображень, 36 джерел, 3 таблиці.

Отримано тонкі композитні плівки $(\text{ПВХ})_{100-x}/(\text{АВ})_x$ на основі полівінілхлоридної матриці та кісточкового активованого вугілля як наповнювача в широкому діапазоні концентрацій останнього - від 0,2 до 30 % мас. Методами скануючої електронної мікроскопії, трансмісійної електронної мікроскопії, термогравіметричного аналізу, термопрограмованої десорбційної мас-спектрометрії, ІЧ - Фур'є спектроскопії, потенціометричного титрування проведено дослідження фізико-хімічних властивостей отриманих композитних плівок та наповнювача. Показано, що активоване вугілля складається переважно з вуглецю та кисню, і його термічна стабільність залежить від вмісту кисню. Виявлено, що на поверхні вугілля присутні різні кисневмісні групи в невеликій кількості - карбоксильні, лактонні, ангідридні та гідроксильні, десорбція яких відбувається у вигляді води та оксидів вуглецю у діапазоні температур від 30 до 900 °С. Результати ІЧ-Фур'є спектроскопії вказують на деякі зміни спектрів, які збільшуються з вмістом наповнювача і досягають 4 см^{-1} при максимальному вмісті вугілля 30 % мас. Досліджено мікрохвильові властивості отриманих композитних плівок в Кв-діапазоні. Встановлено, що втрати на відбиття та втрати на проходження електромагнітних хвиль суттєво залежать від складу отриманих композитних плівок.

Ключові слова: вуглецеві матеріали, мікрохвильові властивості, втрати, композити, полівінілхлорид, радіопоглинаючі матеріали.

Вступ

У сучасному світі, де електроніка та телекомунікації відіграють все більшу роль, зростає й проблема електромагнітного забруднення. Ця проблема викликана надмірним випромінюванням електромагнітних хвиль від приладів, що негативно впливає на здоров'я людей та роботу іншого електронного обладнання. Зростаюча потреба в екрануванні електромагнітного випромінювання стимулює дослідження нових матеріалів. Вуглецеві наноматеріали, такі як вуглецеві мікросфери та нанотрубки, володіють унікальними властивостями, що роблять їх перспективними кандидатами для цієї мети. Вуглецеві композити мають легку вагу, гнучкість, хімічну інертність, низьку собівартість, екологічність та легкість в обробці. Їх висока питома поверхня та пористість роблять їх ефективними поглиначами електромагнітних хвиль[1]. У цьому контексті дослідження та застосування композитних матеріалів на основі різних полімерів та вуглецевих наповнювачів виявляються особливо перспективними, оскільки вони відкривають шлях до створення нового покоління матеріалів з покращеними електромагнітними властивостями для конкретних технічних застосувань. Ці композити можуть знайти своє застосування в електротехніці, енергетичному секторі, виробництві споживчих товарів та інших сферах, де важлива висока ефективність і надійність матеріалів. Дослідження композитів на основі вуглецевих наповнювачів зосереджуються на різноманітних аспектах, включаючи методи синтезу, вплив концентрації компонентів на властивості матеріалу, а також застосування у різних областях.

Таким чином, дослідження та розробка композитних матеріалів на основі вуглецевих наповнювачів мають значний потенціал для вирішення проблем, пов'язаних з електромагнітним забрудненням, та створення нових матеріалів з покращеними властивостями для широкого спектру застосувань.

Розділ 1. Огляд літератури

1.1 Композити на основі полімерів та вуглецевмісних наповнювачів

В сучасному виробництві матеріалів та технологічних процесах, композити на основі полімерів та вуглецевих матеріалів стали об'єктом значного інтересу та досліджень. Полівінілхлорид (ПВХ) є одним з найпоширеніших полімерних матеріалів у світі завдяки своїй високій міцності, хімічній стійкості та довговічності. З іншого боку, серед усіх вуглецевмісних матеріалів активоване вугілля (АВ) відзначається великою поверхнею та адсорбційними властивостями, що робить його важливим матеріалом у сфері фільтрації та очищення.

У літературі широко обговорюється синтез, властивості та застосування композитів, що поєднують у собі ці два ключових компоненти. Дослідження зосереджуються на різноманітних аспектах, включаючи методи синтезу, вплив концентрації компонентів на властивості матеріалу, а також застосування у різних областях, таких як: поглинання надлишкового випромінювання, фільтрація води, виробництво пластикових виробів та інші промислові застосування.

1.2 Короткий огляд історії вивчення композитів.

Історія вивчення композитів налічує кілька десятиліть і представляє собою розвиток матеріалознавства та інженерії. Початок цього шляху можна відслідкувати до середини 20-го століття, коли в період інтенсивного розвитку хімії та полімеризаційних процесів почали досліджувати нові полімерні матеріали.

Перші спроби створення композитів були пов'язані з бажанням поєднати високі міцнісні характеристики ПВХ з електромагнітними та адсорбційними властивостями АВ.

1.3 Загальна визначення та основні характеристики ПВХ та активованого вугілля

ПВХ - це пластиковий полімер, який отримують шляхом полімеризації мономеру вінілхлориду. Цей матеріал відзначається високою міцністю, хімічною стійкістю та витривалістю. Одним із ключових переваг ПВХ є його велика варіабельність властивостей, яка досягається завдяки різним методам модифікації, таким як додавання пластифікаторів, стабілізаторів та інших добавок. Основні характеристики ПВХ включають високу міцність та витривалість, хімічну стійкість та еластичність, яка може бути регульована за допомогою пластифікаторів, стабілізаторів та інших добавок.

Основними характеристиками ПВХ є - міцність та витривалість (високі механічні властивості), хімічна стійкість (стійкий до багатьох хімічних речовин), еластичність (за допомогою додаткових пластифікаторів може досягати заданого рівня гнучкості, пружності або еластичності)[2].

Активоване вугілля — це вид вугілля, який пройшов спеціальний процес активації. Цей процес включає термічну або хімічну обробку вугілля, що призводить до збільшення поверхні мікропористої структури. АВ використовується в різних галузях через свою властивість ефективної адсорбції газів та розчинників.

Основними характеристиками активованого вугілля є:

- Велика поверхня, за рахунок великої кількості мікропор;
- Адсорбція газів та розчинників - являє собою здатність ефективно поглинати гази та інші речовини, що робить АВ цінним матеріалом для фільтрації та очищення середовища;
- Хімічна стійкість.

Ці матеріали використовуються як в окремих формах, так і в композитах, що поєднують їхні властивості, що робить їх особливо цінними у різних галузях, включаючи промисловість, медицину та екологію.

1.4 Практичні застосування композитів на основі ПВХ та активованого вугілля в різних галузях.

Полівінілхлорид та полімери на його основі знаходять широке застосування у футеруванні труб і реакторів в хімічній промисловості, ізоляції електричних дротів, виготовленні штучної шкіри, лінолеуму та інших продуктів. Композити на основі ПВХ та активованого вугілля знаходять своє використання у різних галузях завдяки унікальним властивостям [3]. Ось деякі з найважливіших сфер їхнього застосування:

- **Фільтри:** композити ПВХ/АВ використовуються для виготовлення фільтрів, які забезпечують ефективне очищення води від механічних і хімічних забруднень [4].
- **Каталізатори:** активоване вугілля може використовуватися як каталізатор для проведення хімічних реакцій, що робить композити ПВХ/АВ корисними матеріалами для промислових процесів.
- **Медицина:** композити можуть бути використані в медичних застосуваннях, наприклад, для виготовлення медичних імплантів або фільтрів для очищення рідини від шкідливих речовин.
- **Пакувальні матеріали:** композити ПВХ/АВ можуть бути використані для виготовлення упаковки для харчових продуктів та інших товарів, забезпечуючи їх захист і збереження.
- **Будівельні матеріали:** у будівництві композити можуть використовуватися для створення різних матеріалів, включаючи цеглу, плитку та труби, які відзначаються високою міцністю та стійкістю до корозії.

1.5 Сучасні технології виготовлення композитів.

Протягом розвитку науки про полімери використовувалися два типи класифікацій. Одна класифікація базується на структурі полімера і розділяє полімери на конденсаційні та адіційні. Інша класифікація базується на механізмі полімеризації і розділяє полімеризації на ступінчасті та ланцюгові.

Часто виникає плутанина через те, що обидві класифікації використовуються взаємозамінно без ретельного обміркування. Терміни "конденсація" та "ступінчастість" часто використовуються як синоніми, так само, як і терміни "адіція" та "ланцюгові". Хоча ці терміни часто використовуються як синоніми через те, що більшість конденсаційних полімерів виробляються ступінчастою полімеризацією, а більшість адіційних полімерів - ланцюговою, це не завжди так. Класифікація конденсація-адіція базується на складі або структурі полімерів. Класифікація ступінчаста-ланцюгова базується на механізмах процесів полімеризації [5].

Полімеризація - це будь-який процес, у якому відносно малі молекули, мономери, хімічно об'єднуються, утворюючи дуже велику ланцюгову або сітчасту молекулу, яку називають полімером [6].

Молекули мономерів можуть бути однакові або являти собою дві, три або більше різних сполук. Зазвичай потрібно поєднати щонайменше 100 молекул мономерів, щоб створити продукт, який має певні унікальні фізичні властивості, такі як еластичність, висока міцність на розрив або здатність утворювати волокна, які відрізняють полімери від речовин, що складаються з менших і простіших молекул; часто багато тисяч мономерних одиниць включені в одну молекулу полімеру (рис. 1.1).

Утворення стійких ковалентних хімічних зв'язків між мономерами відрізняє полімеризацію від інших процесів, наприклад кристалізації, при якому велика кількість молекул агрегує під впливом слабких міжмолекулярних сил.

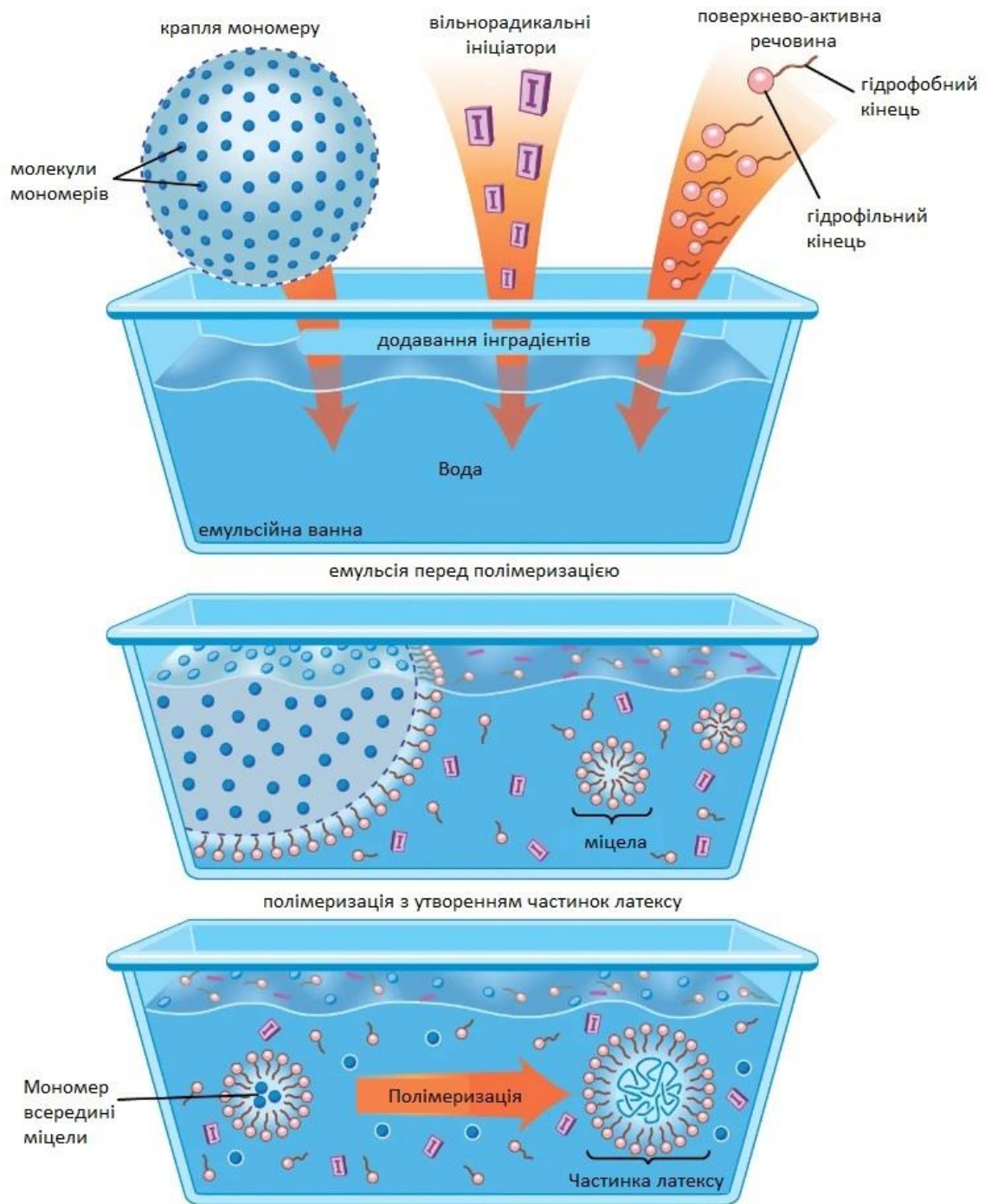


Рис. 1.1. Принципова схема емульсійно-полімеризаційного методу [6].

1.5.1 Радикальна полімеризація.

Радикальна полімеризація -це хімічний процес, в якому мономер (невеликі молекули) з'єднуються, утворюючи довгі ланцюги (полімери). Цей процес ініціюється вільними радикалами, які є хімічно активними молекулами з одним неспареним електроном [7].

У виготовленні композитів на основі ПВХ та АВ радикальна полімеризація використовується для зв'язування компонентів композиту.

Існує два основних методи радикальної полімеризації:

- Емульсійна полімеризація - метод використовується для отримання композитів з дрібними частинками наповнювача, рівномірно розподіленими в матриці. Мономер емульгується у водному розчині за допомогою емульгатора. Ініціатор радикальної полімеризації додається до емульсії, що призводить до утворення вільних радикалів. Вільні радикали атакують молекули мономера, ініціюючи ланцюгову реакцію полімеризації. Частинки наповнювача додаються до емульсії на стадії полімеризації. В результаті утворюється композит з дрібними частинками наповнювача, рівномірно розподіленими в матриці полімеру.
- Суспензійна полімеризація - використовується для отримання композитів з більшими частинками наповнювача. Мономер суспендується у водному розчині за допомогою стабілізатора. Ініціатор радикальної полімеризації додається до суспензії, що призводить до утворення вільних радикалів. Вільні радикали атакують молекули мономера, ініціюючи ланцюгову реакцію полімеризації. Частинки наповнювача додаються до суспензії перед полімеризацією. В результаті утворюється композит з більшими частинками наповнювача, розподіленими в матриці полімеру.

Переваги та недоліки радикальної полімеризації:

Цей метод є відносно простим і недорогим, він дозволяє отримувати композити з різними властивостями, залежно від розміру та розподілу частинок наповнювача. Однак цей метод може призводити до утворення побічних продуктів, які можуть негативно впливати на властивості композиту. Радикальна полімеризація є енергоємною процедурою. Для отримання композиту з бажаними властивостями, варто ретельно контролювати умови полімеризації.

1.5.2 Іонна полімеризація

Іонна полімеризація - це хімічний процес, у якому мономери з'єднуються, утворюючи довгі ланцюги полімерів, ініціюється йонами (катионами або аніонами). У виробництві композитів іонна полімеризація забезпечує зв'язування компонентів. Існують два основних методи:

Катіонна полімеризація:

Мономери розчиняються у полярному розчиннику, куди додається катіонний каталізатор. Катіони атакують молекули мономера, ініціюючи реакцію. Частинки наповнювача додаються до розчину, утворюючи композит з дрібними частинками, рівномірно розподіленими в матриці.

Аніонна полімеризація:

Мономери розчиняються у полярному розчиннику, куди додається аніонний каталізатор. Аніони атакують молекули мономера, ініціюючи реакцію. Частинки наповнювача додаються до розчину перед полімеризацією, утворюючи композит з більш крупними частинками, розподіленими в матриці.

Переваги і недоліки іонної полімеризації: цей метод дозволяє отримати полімери з більш низькою молекулярною масою та вузьким розподілом маси, що робить його більш екологічним. Проте він може бути складнішим у виконанні та вимагати уваги до умов реакції.

1.5.3 Каталізована полімеризація

Каталізована полімеризація - це метод виготовлення полімерів, який використовує каталізатори для стимулювання та прискорення реакції полімеризації. Завдяки цій технології процес утворення полімерів стає більш швидким, ефективним та контрольованим, що робить її цінною альтернативою традиційним методам, таким як радикальна та іонна полімеризація.

Переваги каталізованої полімеризації:

- швидкість - каталізатори значно прискорюють реакцію полімеризації, що робить цей метод більш економічним з точки зору часу та енергії;
- ефективність - каталізована полімеризація може призводити до утворення полімерів з більш вузьким розподілом молекулярної маси та меншою кількістю побічних продуктів;
- контроль - каталізатори дозволяють краще контролювати процес полімеризації, що дає можливість отримувати полімери з бажаними властивостями;
- універсальність - каталізовану полімеризацію можна використовувати для отримання широкого спектру полімерів з різних мономерів.

Типи каталізаторів:

- Координаційні каталізатори: ці каталізатори утворюють комплекси з мономерами, що полегшує їх атаку каталізуючими агентами. Прикладами координаційних каталізаторів є сполуки металів перехідних груп, такі як титан, цирконій та алюміній.
- Кислотно-основні каталізатори: ці каталізатори діють шляхом протонування або депротонування мономерів, що робить їх більш реакційноздатними. Прикладами кислотно-основних каталізаторів є сильні кислоти та основи.

1.5.4 Адиційна полімеризація

Адиційна полімеризація - це метод виготовлення полімерів, який передбачає послідовне приєднання мономерів (невеликих молекул) до одного кінця зростаючого ланцюга, утворюючи довгі молекули полімеру [8]. Цей процес не призводить до утворення побічних продуктів, що робить його екологічно чистим та ефективним методом.

Переваги адиційної полімеризації:

- Відсутність побічних продуктів: цей метод не утворює побічних продуктів, що робить його екологічно чистим та економним.
- Контрольована структура: адиційна полімеризація дозволяє отримувати полімери з чітко визначеною структурою та властивостями.
- Універсальність: цей метод можна використовувати для отримання широкого спектру полімерів з різних мономерів.

Типи адиційної полімеризації:

- Ланцюгова полімеризація: у цьому типі полімеризації активні центри зростання постійно генеруються і рухаються по ланцюгу полімеру. Прикладами ланцюгової полімеризації є полімеризація етилену та стирену.
- Ступінчаста полімеризація: у цьому типі полімеризації активні центри зростання не рухаються по ланцюгу полімеру. Прикладами ступінчастої полімеризації є полімеризація формальдегіду та оксиду етилену.

1.5.5 Конденсаційна полімеризація

Конденсаційна полімеризація - це метод виготовлення полімерів, який передбачає реакцію між двома або більше мономерами з утворенням полімерного ланцюга та видаленням невеликих молекул, таких як вода, спирт або хлорид водню. Цей процес відрізняється від адиційної полімеризації, де

мономери просто приєднуються один до одного без утворення побічних продуктів.

Переваги конденсаційної полімеризації:

- Контрольована структура: конденсаційна полімеризація дозволяє отримувати полімери з чітко визначеною структурою та властивостями.
- Термостійкість: полімери, отримані за допомогою конденсаційної полімеризації, часто мають високу термостійкість та стійкість до хімічних речовин.
- Широкий спектр застосувань: цей метод можна використовувати для отримання широкого спектру полімерів з різними властивостями.

Типи конденсаційної полімеризації:

Ступінчаста полімеризація: у цьому типі полімеризації мономері реагують один з одним попарно, утворюючи димери, які потім можуть реагувати з іншими димерами або мономерами, утворюючи полімерний ланцюг. Прикладами ступінчастої конденсаційної полімеризації є поліконденсація поліетилентерефталату (ПЕТ) та поліконденсація епоксидних смол.

Поліциклізація: у цьому типі полімеризації мономері реагують один з одним, утворюючи циклічні олігомери, які потім можуть з'єднуватися один з одним, утворюючи полімерний ланцюг. Прикладами поліциклізації є полімеризація формальдегіду та полімеризація капролактаму.

1.5.6 Композитування

Композитування - це процес поєднання двох або більше матеріалів з різними властивостями з метою створення нового матеріалу, який має покращені характеристики в порівнянні з початковими компонентами. Цей процес може включати різноманітні методи об'єднання матеріалів, такі як сумішування, нашарування, просочення або вкладення.

Переваги та недоліки методу: вироблені таким методом композитні матеріали мають високу міцність, легкість, жорсткість, стійкість до корозії, кращу теплопровідність і електропровідність, однак при цьому дорожчу вартість та складність виготовлення, а також подільший ремонт та обслуговування [8]. Кожен з цих методів має свої унікальні переваги та має застосування в різних галузях промисловості та наукових дослідженнях.

1.6 Мікрохвильові властивості композитних матеріалів з вуглецевісними наповнювачами

Наукові дослідження властивостей композитних матеріалів в НВЧ діапазоні включають аналіз різних полімерних матеріалів, таких як полівінілхлорид (PVC), поліетилен (PE), полістирол (PS), поліпропілен (PP), поліуретан (PU), поліетилентерефталат (PET), поліакрилонітрил (PAN), полівінілпіролідон (PVP), полікарбонат (PC), поліетилененафталат (PEN), полілактидна кислота (PLA), полі(3,4-етилendioксітіофен) полістирен сульфонат (PEDOT; PSS), і спінені полівінілідендифторид-вуглецеві нанотрубки (PVDF-CNT). Одним із перспективних напрямків досліджень у галузі поглинаючих матеріалів є використання вуглецевих матеріалів. Вуглецеві (вуглецевісні) матеріали мають унікальні властивості, які роблять їх придатними для поглинання електромагнітних хвиль. Такі полімери модифікують вуглецевими матеріалами, такими як графен, карбонові нанотрубки, діамантові частки, нановолокно вуглецевих нанотрубок, нанокристали діоксиду кремнію, вуглецеві нанокристали, керамічні наночастинки, сажа, графенові нанопластинки тощо. Для кожного визначають параметри, такі як розчинник, концентрація вуглецевого матеріалу, діапазон частот, ослаблення, а також основні області застосування. Зібрані дані були порівняні та систематизовані (табл. 1.1) для отримання загального уявлення

про властивості та потенційні області застосування модифікованих полімерних матеріалів у НВЧ діапазоні.

Аналіз літературних даних показує важливість поглинаючих матеріалів у сучасному технологічному середовищі. Результати досліджень також показали, що модифікація полімерів вуглецевими матеріалами та наночастинками значно впливає на їх НВЧ властивості. Коефіцієнт ослаблення модифікованих полімерів значно вищий, ніж у немодифікованих.

Табл. 1.1.

Результати аналізу (назва полімеру, назва ВМ, розчинник, концентрація ВМ, діапазон частот, ослаблення, застосування) наукових досліджень НВЧ властивостей модифікованих ВМ

| Назва полімеру | Назва наповнювача (модифікатора) | Розчинник | К-ція вуглецевого матеріалу, % мас. | Діапазон частот | Ослаблення | Основні області застосування |
|----------------------------|--|-----------------|-------------------------------------|-----------------|------------|------------------------------|
| Полівінілхлорид (PVC) | Графен | Тетрагідрофуран | 5% | 8-12 ГГц | 0,05 дБ/см | Електроніка |
| Поліетилен (PE) | Карбонові нанотрубки | Толуол | 1% | 12-18 ГГц | 0,03 дБ/см | Авіаційна промисловість |
| Полістирол (PS) | Нанокласти з діамантовими частками | Дихлорметан | 3% | 6-10 ГГц | 0,07 дБ/см | Медичні матеріали |
| Поліпропілен (PP) | Нановолокно вуглецевих нанотрубок | Хлороформ | 1,5-5% | 0,01-4 кГц | 0,04 дБ/см | Автомобільна промисловість |
| Поліуретан (PU) | Нанокласти діоксиду кремнію | Етиловий спирт | 2,5% | 5-9 ГГц | 0,06 дБ/см | Електричні ізолятори |
| Поліетилентерефталат (PET) | Нанокласти з вуглецевими нанокристаллами | Ацетон | 2% | 9-13 ГГц | 0,05 дБ/см | Харчова промисловість |
| Поліакрилонітрил (PAN) | Керамічні наночастинки | Ніторметан | 2,5% | 7-11 ГГц | 0,06 дБ/см | Військова техніка |

| | | | | | | |
|--|--|-----------------|-----------|------------|------------|--|
| Полівінілпіролідон (PVP) | Сажа | Діоксид карбону | 1,8% | 11-16 ГГц | 0,03 дБ/см | Електростатичні покриття |
| Полікарбонат (PC) | Нанокompозити з оксиду алюмінію | Бензол | 3% | 8-12 ГГц | 0,07 дБ/см | Оптичні матеріали |
| Поліетиленнафталат (PEN) | Наночастинки оксиду цирконію | Ксілен | 2,2% | 6-10 ГГц | 0,04 дБ/см | Пакувальні матеріали |
| Полілактидна кислота (PLA) [9] | Нановолокно вуглецевих нанотрубок | Дихлорметан | до 15% | 4,5-40 ГГц | 47 дБ | Поглиначі електромагнітного випромінювання |
| Тканини на основі природної та штучної сировини | Полі(3,4-етилендіоксітіофен) полістирен сульфонат (PEDOT;PSS) [10] | Вода | 1-3% | 2-18 ГГц | 20 дБ | Нанесення на м'які/еластичні поверхні |
| Спінені полівінілідендифторид-вуглецеві нанотрубки (PVDF-CNT) [11] | Сажа, вуглецеві нанотрубки, графенові нанопластинки | | 0,4-1,44% | 8-12 ГГц | 29 дБ/см | Поглиначі електромагнітного випромінювання |

Отже, проведений аналіз даних щодо отримання композитних матеріалів показав, що основними полімерними компонентами є вуглецеві матеріали, метали та їх оксиди. Як наповнювачі зазвичай використовують такі матеріали: графен, карбонові нанотрубки, нанокомпозити з діамантовими частками, нановолокна, нанокристали діоксиду кремнію, нанокомпозити з вуглецевими нанокристалами, керамічні наночастинки, сажа, нанокомпозити з оксиду алюмінію, наночастинки оксиду цирконію з вмістом у речовині від 1 % до 17% і розмірами частинок від 1 нм до 100 мкм. Наведено дані щодо ослаблення для вказаних композитних матеріалів, які знаходяться в інтервалі від 0,03 дБ/см до 47 дБ.

Дослідження НВЧ властивостей та електропровідності модифікованих вуглецевих матеріалів свідчать про широкий спектр методів модифікації з метою покращення їхніх хвильових та електропровідних характеристик. Наприклад, окиснення активованого вугілля підвищує його діелектричну проникність, що робить його більш ефективним поглиначем радіохвиль. Модифікація графену металевими наночастинками підвищує його магнітну сприйнятливність, що робить його більш ефективним поглиначем мікрохвиль.

Розділ 2. Методики отримання композитів та методи досліджень

Дослідження матеріалів включає в себе використання різноманітних методів для аналізу їх структури, властивостей та поведінки.

2.1 Вихідні матеріали

Як вихідні було використано зразки кісточкового активованого вугілля (КАВ), технологію одержання якого розроблено в Інституті сорбції та проблем ендоекології НАН України, з розмірами частинок 0,5–1 мм. Основні параметри вихідних зразків КАВ: сорбційний об'єм пор за водою $V_S = 0,41$ см³/г, величина питомої поверхні $S_{\text{пит}} = 1350$ м²/г. Початкову обробку вугілля проводили обеззолуванням за допомогою багаторазового промивання розчином HCl (3%). Потім зразки відмивали дистильованою водою до рН промивних вод 5,5 – 6,0.

2.1.2 Отримання композитних плівок

Отримання плівок проводила наступним чином: спочатку в ступці розтирали вугілля. Далі 0,2 г порошку ПВХ і змішували з необхідною кількістю вугілля. Цю суміш розтирали в агатовій ступці до відносно однорідного стану. Потім висипали у пресформу на поліамідну підкладку і прикапували 70 мг дибутилфталату (пластифікатор для ПВХ). Далі пресували при 175 °С і тиску 10 МПа з витримкою в 1 хвилину.

2.2 Методи досліджень

2.2.1 Скануюча електронна мікроскопія

Скануюча електронна мікроскопія (СЕМ) - це потужний інструмент для візуалізації поверхні зразків матеріалів на мікро- та нанорівнях. Цей метод мікроскопії базується на використанні пучка електронів для сканування поверхні зразка. Пучок електронів взаємодіє зі зразком, викликаючи емісію різних типів сигналів, які збираються й перетворюються в зображення на екрані.

СЕМ здатний досягати значно вищого роздільного здатності, порівняно зі звичайним оптичним мікроскопом, тому може відобразити дрібні деталі структури зразка, такі як пори, включення, частинки тощо. Цей метод дозволяє отримати високоякісні зображення поверхні з великою глибиною різкості, що дозволяє аналізувати різні структурні особливості матеріалу.

Поміж інших переваг СЕМ можна відзначити його здатність аналізувати не тільки форму і текстуру поверхні, але й хімічний склад зразка за допомогою рентгенівської спектроскопії, що дозволяє визначити присутність окремих хімічних елементів або сполук на поверхні зразка. Таким чином, СЕМ є потужним інструментом для вивчення мікроструктури матеріалів та аналізу їх хімічного складу, що забезпечує важливі відомості для дослідження властивостей та застосування матеріалів у різних галузях.

2.2.2 Трансмійна електронна мікроскопія

Трансмійна електронна мікроскопія (ТЕМ) - це метод аналізу структури та морфології матеріалів на мікроскопічному рівні. Основна ідея ТЕМ полягає в тому, що пучок електронів проходить через тонкі зрізи матеріалів та реєструє взаємодію електронів з об'єктом дослідження.

Основні компоненти ТЕМ включають:

- Електронний мікроскоп: у TEM використовуються електрони замість світла для отримання вищого розширення. Електрони генеруються в електронному мікроскопі та пропускаються через тонкі зразки для формування зображення.
- Об'єкт дослідження (зразок): зразок повинен бути тонким, зазвичай менше 100 нанометрів товщини, щоб електрони могли пройти через нього.
- Система лінз: система лінз фокусує пучок електронів, щоб отримати зображення з високою роздільною здатністю.
- Детектори та камера: електрони, що проходять через зразок, взаємодіють з детекторами, а отримане зображення записується за допомогою камери.

TEM дозволяє отримувати дуже деталізовані зображення внутрішньої структури матеріалів, включаючи наночастинки, кристалічні ґратки, біологічні клітини та інші об'єкти на нанометровому рівні. Цей метод також використовується для аналізу хімічного складу зразків за допомогою енергетично-дисперсійного рентгенівського аналізу (EDX) .

2.2.3 Термогравіметричний аналіз

Термогравіметричний аналіз (ТГА) - це метод термічного аналізу, який використовується для визначення зміни маси зразка в залежності від температури. ТГА широко використовується в різних галузях, включаючи матеріалознавство, хімію, фармацевтику та харчову промисловість.

Основним принципом ТГА є вимірювання зміни маси зразка в залежності від температури. Зразок поміщається в термогравіметр, який нагріває його при заданому температурному режимі. Маса зразка вимірюється за допомогою чутливих терезів.

Результат ТГА представляється у вигляді термограми, яка є графіком зміни маси зразка в залежності від температури. Термограма складається з двох основних компонентів:

- Спад маси - це втрата маси зразка внаслідок випаровування, сублімації або термічного розкладання.
- Збільшення маси - це збільшення маси зразка внаслідок поглинання газу або пари.

Метод ТГА може бути використаний для визначення таких характеристик зразка:

- Вміст летких речовин - це кількість речовини, яка випаровується або сублімується при нагріванні.
- Температура плавлення - це температура, при якій зразок плавиться.
- Температура кипіння - це температура, при якій зразок кипить.
- Температура розкладання - це температура, при якій зразок починає розкладатися.

ТГА також може бути використаний для ідентифікації різних видів матеріалів. Наприклад, ТГА може бути використаний для ідентифікації пластмас, полімерів, фармацевтичних препаратів та харчових продуктів.

2.2.4 Термопрограмована десорбційна мас-спектрометрія

Термопрограмована десорбційна мас-спектрометрія (ТПДМС) - це метод мас-спектрометрії, який використовується для визначення складу поверхні твердих матеріалів. ТПДМС поєднує в собі два методи: термічну десорбцію (ТД) і мас-спектрометрію.

Основним принципом ТПДМС є вимірювання маси речовин, які десорбуються з поверхні твердого матеріалу при нагріванні. Зразок поміщається в термодесорбер, який нагріває його при заданому

температурному режимі. Повітря або інший газ пропускається над поверхнею зразка, і десорбовані речовини захоплюються мас-спектрометром.

Результат ТПДМС представляється у вигляді термограми, яка є графіком зміни маси десорбованих речовин в залежності від температури. Термограма складається з двох основних компонентів: Спад маси - це втрата маси зразка внаслідок десорбції речовин з його поверхні та Збільшення маси - це збільшення маси зразка внаслідок адсорбції речовин з навколишнього середовища.

2.2.5 ІЧ- Фур'є спектроскопія

ІЧ-Фур'є спектроскопія (FTIR) є потужним методом дослідження, який знаходить широке застосування у вивченні хімічної структури та властивостей композитних матеріалів [12]. Метод заснований на вимірюванні інфрачервоного або видимого випромінювання, яке поглинається або розсіюється зразком, цей метод дозволяє отримувати значущу інформацію про різні аспекти композитів. Наприклад:

- Типи функціональних груп: різні молекули та групи атомів поглинають ІЧ або видиме випромінювання на певних частотах, що дозволяє ідентифікувати їх присутність у композиті.
- Концентрація компонентів: інтенсивність спектральних піків може бути пов'язана з концентрацією компонентів у композиті, що дає можливість кількісного аналізу.
- Взаємодія між компонентами: ІЧ-Фур'є спектроскопія може виявляти водневі зв'язки, комплексоутворення та інші типи взаємодії між компонентами композиту.
- Структура та морфологія: ІЧ-Фур'є спектроскопія може використовуватися для дослідження структури та морфології композиту,

таких як кристалічність, орієнтація молекул та розподіл частинок наповнювача.

Плюси Фур'є-спектроскопії включають універсальність, неруйнівний характер і швидкість проведення досліджень. Однак, метод також має свої недоліки, такі як складність інтерпретації спектрів та обмежена чутливість до деяких компонентів або дефектів у матеріалі.

Розділ 3. Результати досліджень зразків композитних матеріалів

3.1. Результати досліджень композитів методами TEM та SEM.

Досліджені частинки активованого вугілля мають розміри у діапазоні від 0,5 до 1,1 мкм. Сорбційний об'єм пор за водою становить $0,45 \text{ см}^3/\text{г}$, а питома поверхня рівна $1345 \text{ м}^2/\text{г}$.

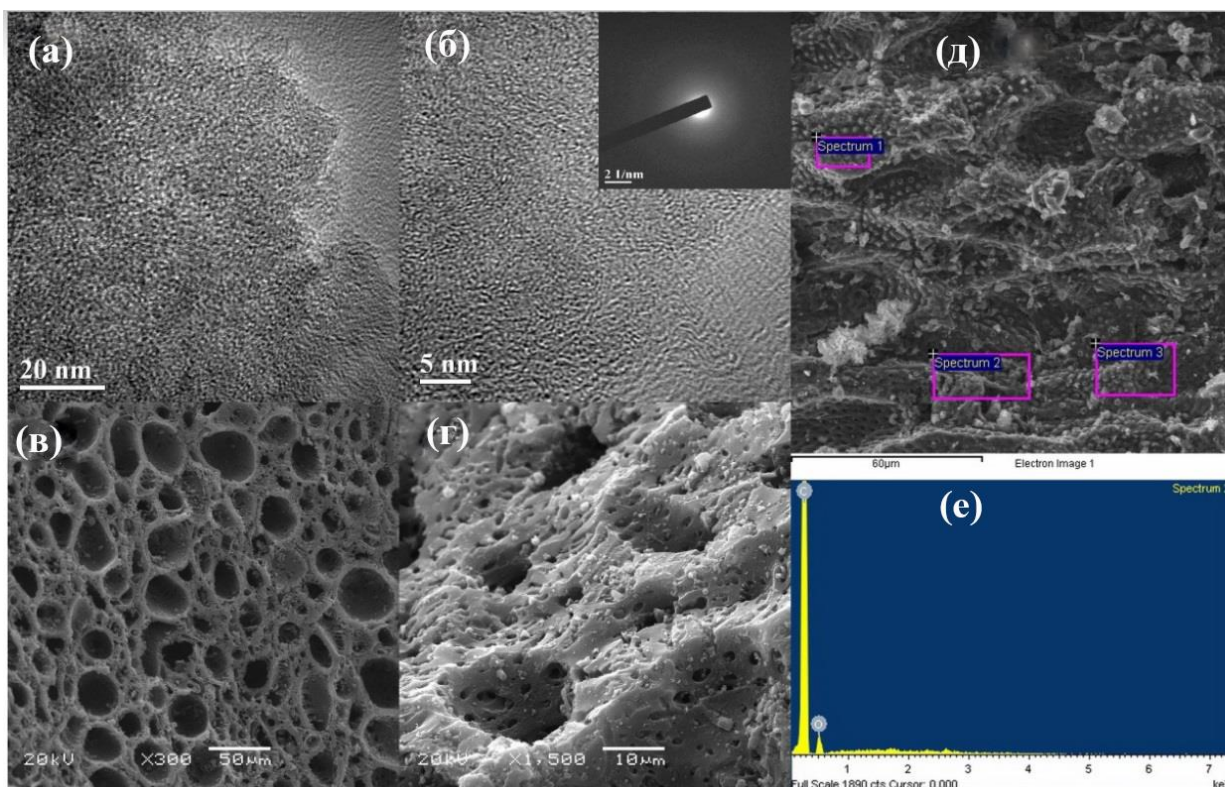


Рис. 3.1. Зображення HRTEM (а) і (б) та SAED-вставка в (б), SEM мікрографії (в) – (д) та спектр EDX (е) активованого вугілля.

На рис. 1(а) можна побачити неправильно розміщені шари неупорядкованих нановуглецевих структур. Приблизно 3–4 нановуглецеві шари можуть утворювати аморфну тверду структуру низької ступеня впорядкованості, як показано на рис. 1 (а) та 1 (б). Аналіз SAED показав кільцеві візерунки, розподілені по всій напіваморфній структурі активованого вугілля, що відповідають площинам графіту (002) та (100), як показано на вставці до рис. 1 (б). Це співприсутність аморфного та структурованого вуглецю також є типовою для АВ, отриманого карбонізацією кополімеру полівінілпіридину-дивінілбензолу [13]. Кристалічні компоненти аморфних продуктів, згідно з результатами обчислень [14-16], можуть містити фрагменти поліароматичних вуглеводнів, що свідчить про високий рівень множинності різних форм вуглецю. Крім того, СЕМ зображення виявили добре розвинуту пористу структуру АВ, що в основному складається з каналів змінної глибини, з входами в діаметрі 30 – 37,5 мкм, менше 25 мкм, та входами розміром до 4 мікрметрів, як показано на рис. 3.1 (в) і 3.1 (г).

Табл. 3.1. Результати аналізу СЕМ-EDX активованого вугілля.

| Спектр | Вміст елементів, мас % | |
|------------------|------------------------|------|
| | С | О |
| Спектр 1 | 96.32 | 3.68 |
| Спектр 2 | 96.05 | 3.95 |
| Спектр 3 | 96.21 | 3.79 |
| Середнє | 96.19 | 3.81 |
| Стат. відхилення | 0.14 | 0.14 |
| Максимум | 96.32 | 3.95 |
| Мінімум | 96.05 | 3.68 |

Висока структурна схожість спостерігається між азотомодифікованим вугіллям SCN та вугіллям SKS [13] та кісточковим АВ як на наномасштабному, так і на мікроскопічному рівнях. Аналіз СЕМ-EDX АВ показує присутність лише вуглецю та кисню, як показано на рис. 1 (д) і 1 (е). Середній вміст вуглецю становить 96,16 мас.% і середній вміст кисню - 3,81 мас.% (табл. 3.1).

3.2. Результати досліджень композитів методами ТПДМС та ТГА

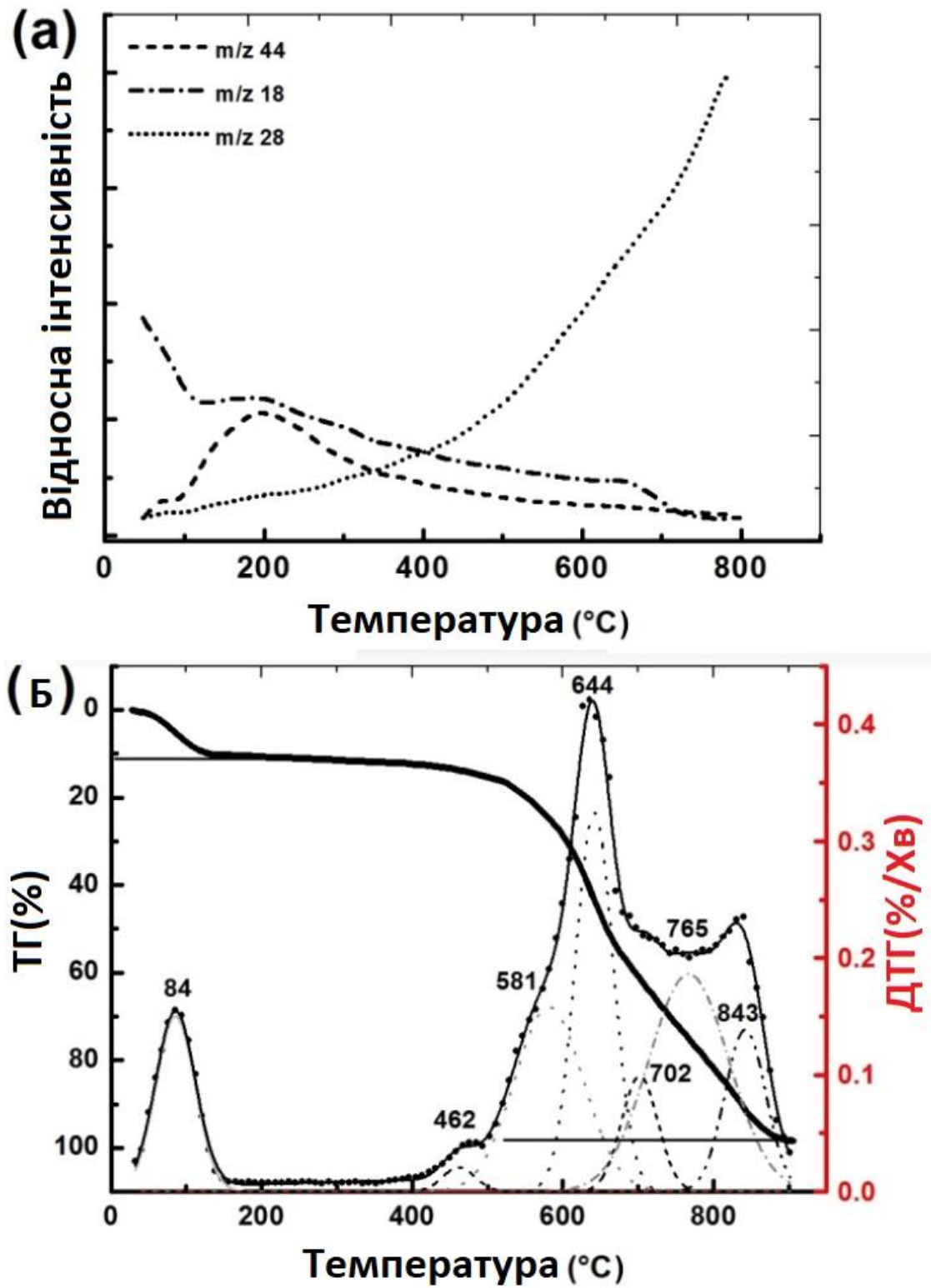


Рис. 3.2 Результати ТПДМС (а) та ТГА (б) для АВ.

Дані ТПДМС показують, що з поверхні АВ може адсорбуватися вода (H_2O), оксид вуглецю (CO) та діоксид вуглецю (CO_2). Після нагрівання порошку АВ у вакуумі ідентифікували молекулярні іони з відповідними значеннями m/z 18, 28 та 44 на мас-спектрах (рис. 3.2.(a)). Адсорбована вода, включаючи рекомбіновану воду, що утворюється внаслідок термічного розкладу кисневмісних груп на поверхні, десорбується в широкому температурному діапазоні. Фізсорбована вода виділяється між 30 °C та 100–150 °C, тоді як рекомбінована вода виділяється між 150 °C та 280 °C. Припускається, що спостережена рекомбінована вода пов'язана з термічним розкладом карбоксильних груп [15,16], що підтверджується одночасним виділенням CO_2 . Профіль з m/z 44 показує широкий пік десорбції при 200 °C в межах вищезазначеного температурного діапазону (рис. 3.2.(a)). Крім того, при вищих температурах (понад 600 °C) виділяється рекомбінована вода, що свідчить про термоліз гідроксильних та фенольних груп [17,18]. Це припущення підтримується помітним виділенням молекул CO , виявлених в мас-спектрах десорбованого газу при цих температурах. Термодесорбція оксидів вуглецю у температурному діапазоні від 180 до 380 °C відповідає вакуумному термолізу кисневмісних груп на поверхні [19], які мають найменшу термічну стійкість. Зазвичай слабкі кислотні центри [20], тобто карбоксильні групи, зазнають термічного розкладу у цьому діапазоні. Залежно від концентрації карбоксильних груп на поверхні, їх розклад може відбуватися за різними механізмами, що призводить до утворення відповідних продуктів (вода, CO_2 , поверхневий ангідрид тощо) у певних температурних діапазонах [21-23]. Температура розкладу впливає на концентрацію карбоксильних груп та інших поверхневих груп, що корелює з взаємодією між сусідніми групами [23]. У температурному діапазоні від 380 до 600 °C термостабільні лактонові та ангідридні групи зазнають термічного розкладу [24]. Температурний діапазон від 600 до 900 °C відповідає термічній десорбції продуктів вакуумного термолізу фенольних та карбонільних груп [25].

Під час термогравіметричного аналізу АВ на повітрі було спостережено три різні стадії розкладу зразків на термограмі (рис. 3.2(б)). Перша стадія призводить до значної втрати маси в діапазоні температур 30–150 °С через випаровування води, що свідчить про те, що вміст води в зразку перевищує 10% за масою. Подальше нагрівання спричиняє розклад поверхневих груп, що містять кисень [26]. Термічний розклад карбоксильних кислот, лактонних та ангідридних груп призводить до зменшення маси на 5% між температурами 500–510 °С через окиснення поверхні вуглецю, що призводить до збільшення втрати маси, причому обидва ефекти перебувають у рівновазі [27]. При температурах, що перевищують 500 °С, спостерігається значна втрата маси внаслідок термічного розкладу поверхневих груп, що містять кисень [28,29] та горіння АВ на повітрі, що призводить до утворення летких оксидів вуглецю [30]. Схожі висновки до наших поточних результатів були отримані в попередніх дослідженнях термічного аналізу [31, 32].

Зменшення втрати маси при та після цих температурах в безкисневій атмосфері аргону зумовлене термічним розкладом в першу чергу ангідридних і лактонових груп. Варто відзначити, що фенольні групи дають свій внесок у зменшення втрати маси при дослідженні зразків в атмосфері аргону, але лише при температурах понад 600 °С.

З результатів потенціометричного титрування (ПТ) водних суспензій АВ видно, що загальна концентрація кисневмісних груп становить 1,0 ммоль/г, включаючи карбоксильні групи у кількості 0,11 ммоль/г, гідроксильні групи у кількості 0,45 ммоль/г та карбонільні групи у кількості 0,44 ммоль/г. Згідно з даними по ПТ, на поверхні практично відсутні лактонові та ангідридні групи.

3.3. Результати досліджень композитів методом ІЧ-Фур'є спектроскопії

Рис. 3.3. та табл. 3.2. показують результати аналізу ІЧ-спектрів. ІЧ-спектри вказують на незначні зміщення положень смуг ПВХ у вивчених композитах, що коливаються від 1 до 3 см^{-1} порівняно з чистим ПВХ.

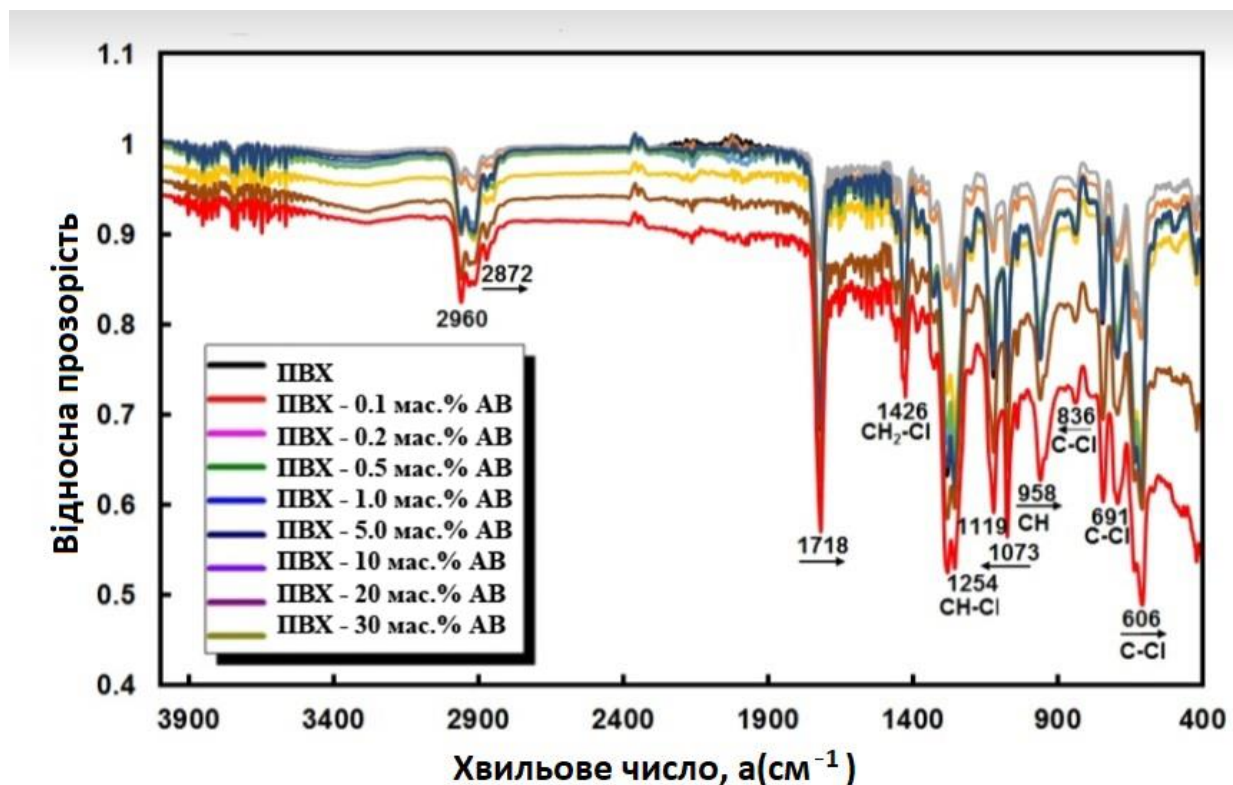


Рис. 3.3. ІЧ- Фур'є спектри плівок $(\text{PVC})_{100-x}/(\text{AB})_x$

Табл. 3.2 Деякі визначені характеристичні ІЧ- смуги композитних плівок $(\text{PVC})_{100-x}/(\text{AB})_x$ та їх положення відповідно до [34–36].

| Хвильове число (см^{-1}) | Групи (типи зв'язків) | Хвильове число (см^{-1}) | |
|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| | | ПВХ | $(\text{PVC})_{100-x}/(\text{AB})_x$ |
| 610 | еластичні коливання | 610 | 607-611 |
| 693 | | 693 | 692-693 |

| | | | |
|------|--|------|-----------|
| 838 | зв'язків С–Сl | 838 | 835-838 |
| 960 | рансформація С– Н відносно площини | 960 | 959-960 |
| 1254 | відхилення СН– Сl відносно площини | 1254 | 1254-1255 |
| 1426 | деформація кута СН2-Сl | 1426 | 1425-1426 |
| 2961 | Коливання С–Н у зв'язку СН–Сl | 2961 | 2960-2961 |

При низькому вмісті наповнювача (АВ) спостерігається незначний зсув або відсутність зсувів у положенні спектральних піків, пов'язаних з коливаннями ПВХ. Однак є помітні зміни спектрів, які збільшуються з вмістом наповнювача і, нарешті, досягають 4 см^{-1} при максимальному вмісті вугілля у 30 % мас. Рис. 3.3 також показує смуги коливання при 1073 см^{-1} , 1119 см^{-1} , 1718 см^{-1} , 2872 см^{-1} та 2960 см^{-1} , які відповідають залишкам пластифікатора DBP та мають місце при 3369 , 2920 , 2851 , 1727 , 1157 та 1056 см^{-1} [33].

3.4. Мікрохвильові властивості композитів

Експериментальні результати, зображені на рис. 3.4(а) та (б), свідчать про те, що втрати на відбиття тонких композитних плівок $(\text{ПВХ})_{100-x}/(\text{АВ})_x$ виявляють нерівномірність у діапазоні частот Ка-діапазону, коливаючись між -12 дБ та -20 дБ при концентрації АВ у діапазоні від 0,1 до 10 % мас. Цей результат вважається прийнятним для тонких композитних плівок в

надвисокочастотному мікрохвилям Ка-діапазону. При вищих концентраціях АВ 20 та 30 % мас тонкі композитні плівки $(\text{ПВХ})_{100-x}/(\text{АВ})_x$ виявляють втрати

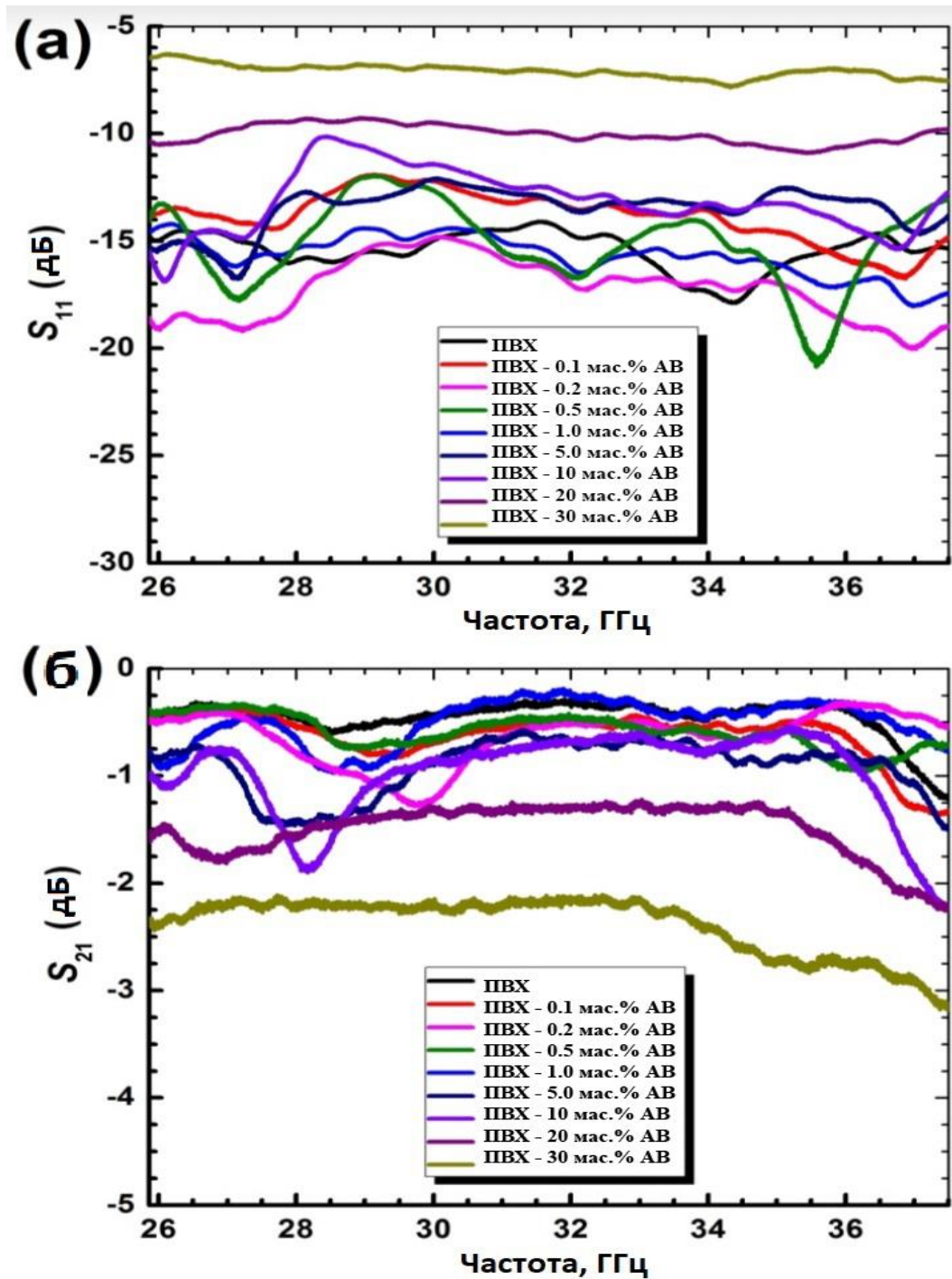


Рис. 3.4. Залежність втрат на відбиття S_{11} (а) та втрат на проходження S_{21} (б) чистих плівок ПВХ та тонких композитних плівок $(\text{ПВХ})_{100-x}/(\text{АВ})_x$ в Ка-діапазоні.

на відбиття -10 дБ та -7 дБ відповідно. Відсоток відбитих сигналів з плівок досить великий. Зазвичай зі збільшенням кількості наповнювача зменшуються маскуючі властивості композитних плівок на основі ПВХ.

При вмісті АВ $0,5$ % мас відповідні композитні плівки виявляють прозоре частотне вікно, зосереджене приблизно на $35,57$ ГГц.

Тонкі композитні плівки $(\text{ПВХ})_{100-x}/(\text{АВ})_x$ з середньою товщиною $0,25$ мм демонструють слабку взаємодію з ЕМХ та показують втрати на проходження -1 дБ майже для всіх плівок на протязі широкого діапазону досліджених частот. Тільки при вмісті АВ 30 % мас відповідні композитні плівки показують невелике збільшення втрат на проходження, рівне -2 дБ. Тонкі композитні плівки $(\text{ПВХ})_{100-x}/(\text{АВ})_x$ з вмістом АВ $0,2$ % виявляють найнижчі втрати на відбиття S11 приблизно -17 дБ, тоді як зразки з вмістом АВ 30 % мас мають максимальні втрати на проходження, рівні $-2,5$ дБ.

Висновки

1. Вперше було отримано тонкі композитні плівки $(\text{ПВХ})_{100-x}/(\text{АВ})_x$ на основі полівінілхлоридної матриці та кісточкового активованого вугілля як наповнювача в широкому діапазоні концентрацій останнього - від 0,2 до 30 %мас.

2. Досліджено фізико-хімічні властивості отриманих композитних плівок та наповнювача. Аналіз СЕМ/EDX показав, що активоване вугілля складається переважно з вуглецю та кисню, і його термічна стабільність залежить від вмісту кисню.

3. За допомогою методів ТПДМС та ТГА було досліджено термічний розклад різних кисневмісних груп у зразках вугілля- карбоксильних лактонних, ангідридних та гідроксильних. Виявлено, що десорбція кисневмісних груп з поверхні вугілля здійснюється у вигляді води та оксидів вуглецю і відбувається у діапазоні температур від 30 до 900 °С.

4. Було досліджено мікрохвильові властивості отриманих композитних плівок в Ка-діапазоні. Встановлено, що втрати на відбиття та втрати на проходження електромагнітних хвиль суттєво залежать від складу отриманих композитних плівок. При зростанні концентрації наповнювача втрати на відбиття змінюються від -20 дБ до -7,9 дБ, при концентраціях вугілля 0,5 та 30% мас відповідно. Максимальні втрати на відбиття мають зразки невисокою концентрацією наповнювача – 0,2-0,5%. Показано, що значення втрат на проходження слабо залежить від вмісту наповнювача і складають від -0,5 дБ до 2,1 дБ при концентраціях вугілля 1 та 30 % мас відповідно. При зростанні концентрації наповнювача відбувається зростання відбиття хвиль від даного матеріалу та збільшення втрат на проходження.

5. Дослідження показали, що активоване вугілля є екологічно чистим та економічно вигідним наповнювачем, яке легко отримувати та використовувати. Метод гарячого пресування запропоновано як простий та

ефективний спосіб виготовлення композитних плівок, що мають суттєві втрати на відбиття електромагнітних хвиль в Ka-діапазоні.

Список використаних джерел

1. Yoon-Ji Y. Preparation and Characterization of Activated Carbon/Polymer Composites: A Review [Електронний ресурс] / Y. Yoon-Ji, K. Byung-Joo // DN&AME. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/16/3472>.
2. McNaught A. Compendium of Chemical Terminology / A. McNaught, Wilkinson // 2nd ed. / A. McNaught, Wilkinson., 1997. – С. 2303–2306.
3. В.І. Саранчук, М.О.Ільяшов, В.В. Ошовський, В.С.Білецький. Хімія і фізика горючих копалин. - Донецьк: Східний видавничий дім, 2008. – с. 57.
4. A review on production and application of activated carbon from discarded plastics in the context of ‘waste treats waste’, Rouni Bhattacharya, Journal of Environmental Management, Volume 325, Part B, 1 January 2023, 116613 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116613>
5. Odian, George (2004). Principles of Polymerization (4th ed.). Hoboken, NJ: Wiley-Interscience. ISBN 978-0-471-27400-1
6. Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2020, May 26). polymerization. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/polymerization>
7. Słomkowski, Stanislaw; Alemán, José V.; Gilbert, Robert G.; Hess, Michael; Horie, Kazuyuki; Jones, Richard G.; Kubisa, Przemyslaw; Meisel, Ingrid; Mormann, Werner; Penczek, Stanisław; Stepto, Robert F. T. (2011). "Terminology of polymers and polymerization processes in dispersed systems (IUPAC Recommendations 2011)". Pure and Applied Chemistry. 83 (12): 2229–2259. <https://doi.org/10.1351/PAC-REC-10-06-03>
8. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2009). Materials Science and Engineering: An Introduction (8th ed.). Wiley. ISBN: 978-0470419977

9. Three-Dimensional-Printed Carbon Nanotube/Polylactic Acid Composite for Efficient Electromagnetic Interference Shielding [Електронний ресурс] / [X.Zhenzhen, D. Tiantian, W. Yazhou та ін.]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/14/3080>.
10. The Impact of Structural Variations and Coating Techniques on the Microwave Properties of Woven Fabrics Coated with PEDOT:PSS Composition [Електронний ресурс] / [V. Rubežienė, S. Varnaitė-Žuravliova, A. Sankauskaitė та ін.]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/21/4224>.
11. Recent Trends in Polymeric Foams and Porous Structures for Electromagnetic Interference Shielding Applications - Polymers 2024, 16(2), 195; <https://doi.org/10.3390/polym16020195>
12. Fourier Transform Infrared Spectroscopy of Polymer Composites by Youssef El-Halimi (2017) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022286080850630>
13. V. D. Khavryuchenko et al., Materials 2 (3), 1239 (2009). doi:10.3390/ma2031239
14. V. D. Khavryuchenko et al., Chem. Phys. 352 (1-3), 231 (2008). doi:10.1016/j.chemphys.2008.06.019
15. V. D. Khavryuchenko, O. V. Khavryuchenko & V. V. Lisnyak, Chem. Phys. 368 (1-2), 83 (2010). doi:10.1016/j.chemphys.2009.12.022
16. V. D. Khavryuchenko et al., Int. J. Mod. Phys. B 21 (26), 4507 (2007). doi:10.1142/S0217979207037946
17. L. M. Grishchenko et al., Mol. Cryst. Liq. Cryst. 673 (1), 1 (2018). doi:10.1080/15421406.2019.1578488
18. J. L. Figueiredo et al., Carbon 37, 1379 (1999). doi:10.1016/S0008-6223(98)00333-9
19. M. Ai Qin et al., Appl. Chem. Ind. 40 (07), 266 (2011). doi:10.16581/j.cnki.issn1671-3206.2011.07.033

20. P. Brender et al., *Anal. Chem.* 84 (5), 2147 (2012). doi:10.1021/ac102244b
21. K. H. Kangasniemi, D. A. Condit & T. D. Jarvi, *J. Electrochem. Soc.* 151 (4), E125 (2004). doi:10.1149/1.1649756
22. H. P. Boehm, *Carbon* 40 (2), 145 (2002). doi:10.1016/s0008-6223(01)00165-8
23. R. P. Rocha et al., *Catal. Today* 418, 114136 (2023). doi:10.1016/j.cattod.2023.114136
24. T. Kyotani et al., *Carbon Reports* 1, 188 (2022). doi:10.7209/carbon.010406
25. J. Zhou et al., *Nat. Commun.* 14, 2293 (2023). doi:10.1038/s41467-023-37962-3
26. Q.-L. Zhuang, T. Kyotani & A. Tomita, *Carbon* 32, 539 (1994). doi:10.1016/0008-6223(94)90177-5
27. G. Barco et al., *J. Chem. Phys.* 125, 194706 (2006). doi:10.1063/1.2360277
28. S. Kundu, *J. Phys. Chem. C* 112, 16869 (2008). doi:10.1021/jp804413a
29. J. H. Zhou et al., *Carbon* 45, 785 (2007). doi:10.1016/j.carbon.2006.11.019
30. K. Jayaraman, M. V. Kok & I. Gokalp, *Appl. Therm. Eng.* 125, 1446 (2017).doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.07.128
31. L. M. Grishchenko. *Conf. Proc. NAP-2017, IEEE 7th Int. Conf. "Nanomaterials:Applications & Properties" (NAP).* 1, 01PCSI19-1 (2017).doi:10.1109/NAP.2017.8190155.
32. E. Vottero et al., *Catal. Sci. & Technol.* 12, 1271 (2022).doi:10.1039/D1CY01751A
33. A. Kumari & R. Kaur, *PeerJ* 10, e12859 (2022). doi:10.7717/peerj.12859

34. L. Coltro, J. B. Pitta & E. Madaleno, *Polym. Test.* 32 (2), 272 (2013).doi:10.1016/j.polymertesting.2012.11.009
35. M. Beltrán & A. Marcilla, *Eur. Polym. J.* 33 (7), 1135 (1997).doi:10.1016/S0014-3057(97)00001-3
36. N. González & M. J. Fernández-Berridi, *J. Appl. Polym. Sci.* 101, 1731 (2006). doi:10.1002/app.23381