

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА

ВОЛЧЕНКОВ ІГОР В'ЯЧЕСЛАВОВИЧ

Допускається до захисту:
в.о. завідувача кафедри
фундаментальної та прикладної
хімії, д-р фіз.-мат. наук, с. н. с.
Юлія РАССОХІНА
« ____ » _____ 2026 р.

**ВПЛИВ ВМІСТУ ТА РОЗМІРУ ЧАСТИНОК ВУГЛЕЦЕВОЇ САЖІ
НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА УФ-СТІЙКІСТЬ
НАНОКОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ПОЛІВІНІЛХЛОРИДУ**

Спеціальність 102 Хімія
Кваліфікаційна робота магістра

Науковий керівник:
С. В. Жильцова, доцент кафедри
фундаментальної та прикладної хімії,
канд. хім. наук, доцент

підпис

Оцінка: / ____ / ____ / ____
(бали / за шкалою ЕКТС/ за національною шкалою)
Голова ЕК: _____
(підпис)

Вінниця 2026

АНОТАЦІЯ

Волченков І. В. Вплив вмісту та розміру частинок вуглецевої сажі на механічні властивості та УФ-стійкість нанокомпозитів на основі полівінілхлориду. Спеціальність 102 Хімія, освітня програма «Хімія». Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, 2026.

Робота спрямована на дослідження впливу вмісту та розміру частинок нанодисперсної вуглецевої сажі на ударну в'язкість та УФ-стійкість ПВХ-композитів.

Встановлено, що введення 1 мас.% наповнювача розміром 29 нм забезпечує енергію руйнування на 41 % вище за показники систем із частинками меншої дисперсності (34 нм). За результатами кліматичних випробувань, оптимальну фотостабільність виявив композит із вмістом 2 мас.% наповнювача (29 нм): деструкція поверхні відсутня протягом 2000 год опромінення. Визначено склад (1 мас.%, 29 нм), що поєднує високу ударну в'язкість та стійкість до старіння.

Отримані результати можуть бути використані при розробці довговічних ПВХ-матеріалів для експлуатації в умовах впливу сонячного випромінювання та атмосферних чинників.

Ключові слова: вуглецева сажа, полівінілхлорид, композити, ударна стійкість, УФ-стійкість.

Табл. 6. Рис. 19. Бібліограф.: 30 найм.

Volchenkov I. Effect of Carbon Black Content and Particle Size on the Mechanical Properties and UV Resistance of Polyvinyl Chloride-Based Nanocomposites. Speciality 102 Chemistry, educational programme "Chemistry". Vasyl' Stus Donetsk National University, Vinnytsia, 2026.

The study investigates the effect of nanodispersed carbon black content and particle size on the impact strength and UV resistance of PVC composites.

It was found that incorporating 1 wt.% of 29 nm filler provides a fracture energy 41 % higher than that of systems with larger particles (34 nm). According to weathering tests, the composite with 2 wt.% filler (29 nm) exhibited optimal photostability, showing no surface degradation over 2000 hours of UV exposure. The formulation (1 wt.%, 29 nm) was identified as providing the best balance between high impact strength and aging resistance.

The results can be applied to develop durable PVC materials for long-term outdoor use under solar radiation and atmospheric conditions.

Keywords: carbon black, polyvinyl chloride, composites, impact resistance, UV resistance.

Tabl. 6. Fig. 19. Bibliography: 30 items.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ЗМІСТ	4
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ПОЛІМЕРНІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ПОЛІВІНІЛХЛОРИДУ І КАРБОНОВИХ НАНОНАПОВНЮВАЧІВ	11
1.1 Вуглецеві наповнювачі як модифікатори полімерів	11
1.2 Полівінілхлорид як матриця для виготовлення полімерних композиційних матеріалів	16
1.2.1 Модифікатори ПВХ	17
1.2.2 Диспергування і механічні методи змішування ПВХ-композицій... ..	19
1.4 ПВХ-композити, модифіковані вуглецевими наповнювачами	22
РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	28
2.1 Об'єкти та матеріали дослідження	28
2.2 Методи та методики дослідження	30
2.2.1 Компаундування полімерних композиційних матеріалів	30
2.2.2 Виготовлення зразків композитів методом екструзії	31
2.2.3 Дослідження механічних властивостей композиційних матеріалів	33
2.2.4 Дослідження стійкості до дії ультрафіолету методом прискореного старіння	35
2.3 Техніка безпеки та вимоги охорони праці на об'єктах з переробки пластичних мас	36
2.4 Вимоги до пожежної безпеки на об'єктах з переробки пластичних мас	37
3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	39
3.1 Одержання ПВХ-композитів	39
3.2 Оцінка механічних характеристик ПВХ-композитів в умовах динамічного навантаження	41

3.3 Результати прискорених кліматичних випробувань модифікованих ПВХ-композитів	48
ВИСНОВКИ.....	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ	54
Додаток А. Акт про впровадження результатів кваліфікаційної (магістерської) роботи «Вплив вмісту та розміру частинок вуглецевої сажі на механічні властивості та УФ-стійкість нанокompозитів на основі полівінілхлориду».....	59
Додаток Б. Сертифікат відповідності № UA.15.003.07078-25.....	61



**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**



E	енергія руйнування
H_{50}	середня висота руйнування
UV	ультрафіолетовий
ΔE	загальна зміна кольору зразка після кліматичного старіння
BH	вуглецевий наповнювач
ПАР	поверхнево-активна речовина
ПВХ	полівінілхлорид
ТВ	технічний вуглець
УФ	ультрафіолетовий

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Полівінілхлорид (ПВХ) є одним із найпоширеніших термопластів завдяки відмінним властивостям, таким як висока механічна міцність, корозійна стійкість, добра вогнестійкість, зносостійкість і низька вартість, завдяки чому його використовують у будівництві, пакувальній, автомобільній промисловості, медицині, виробництві іграшок, покриттів тощо. Для покращення перероблюваності композитів на основі ПВХ під час змішування до рецептури вводять пластифікатори, термостабілізатори та мастильні добавки [1]. Також актуальним є додавання функціональних наповнювачів, здатних покращувати експлуатаційні характеристики матеріалів.

Нанокompозити на основі ПВХ демонструють кращі механічні, термічні, реологічні, фотостабільні, бар'єрні, антибактеріальні та вогнестійкі характеристики залежно від типу обраного нанонаповнювача, розміру, а також підходів до їх отримання [2]. Серед таких наповнювачів особливу увагу привертають вуглецеві матеріали: графен, вуглецеві нанотрубки [3], оксид графену [1], терморозширений графіт, технічний вуглець [4], – здатні суттєво змінити експлуатаційні характеристики композитів.

Технічний вуглець є перспективним наповнювачем, який може підвищувати фотостабільність, механічну міцність, електропровідність полімерів. Водночас, його вплив на властивості композитів на основі полівінілхлориду, зокрема залежність від розміру частинок і концентрації, залишається недостатньо вивченим. Тому дослідження впливу технічного вуглецю (вуглецевої сажі) на механічні показники та УФ-стійкість ПВХ-матеріалів може мати і наукову цінність, і практичне значення.

Об'єкт дослідження – нанокompозити на основі полівінілхлориду, модифіковані нанодисперсною вуглецевою сажею.

Предмет дослідження – закономірності впливу дисперсності та концентрації частинок вуглецевої сажі на механічні властивості та УФ-стійкість ПВХ-композитів.

Мета дослідження – встановлення залежності між структурними параметрами вуглецевої сажі (дисперсність, вміст) та експлуатаційною стійкістю ПВХ-композитів до ударних навантажень і УФ-випромінювання. Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі *завдання*:

- здійснити критичний аналіз літературних джерел щодо модифікації полівінілхлориду вуглецевими наповнювачами;
- підібрати склад композиції та умови проведення експерименту;
- одержати композити з різним вмістом та розміром частинок нанодисперсної вуглецевої сажі;
- дослідити вплив наповнювача на механічні властивості (зокрема ударну в'язкість) одержаних композитів;
- оцінити вплив наповнювача на УФ-стійкість отриманих матеріалів;
- встановити закономірності впливу розмірів частинок наповнювача та його вмісту на експлуатаційні характеристики отриманих матеріалів;
- запропонувати оптимальні параметри, які забезпечуватимуть отримання довговічних ПВХ-матеріалів для експлуатації в умовах впливу сонячного випромінювання та атмосферних чинників.

Методи дослідження – для одержання зразків полімерних композитів використовували компаундування у високошвидкісному нагрівально-охолоджувальному міксері з подальшою екструзією сумішей компонентів; енергію руйнування зразків визначали методом удару падаючого вантажу масою 1 кг (відповідно до відповідного стандарту для ПВХ-труб); зміну енергії руйнування під дією ультрафіолетового випромінювання досліджували після опромінення зразків за допомогою ртутно-кварцової лампи типу ДРТ-250 потужністю 250 Вт; стійкість до ультрафіолетового старіння оцінювали методом прискорених кліматичних випробувань QUV згідно з методикою ASTM G154.

Наукова новизна дослідження полягає у тому, що вперше вивчено закономірності впливу вмісту та розміру частинок нанодисперсної вуглецевої сажі на механічні властивості та УФ-стійкість полімерних композитів на основі полівінілхлориду. Показано, що зміна розміру частинок вуглецевого наповнювача суттєво впливає на ударну в'язкість та ступінь захисту матеріалу від ультрафіолетового випромінювання. Встановлено існування оптимального інтервалу концентрацій наповнювача, за якого досягається одночасне підвищення ударної в'язкості та УФ-стабільності ПВХ-композитів.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані у роботі результати можуть бути використані при розробці та оптимізації складу матеріалів на основі полівінілхлориду з підвищеною довговічністю для експлуатації в умовах інтенсивного УФ-випромінювання та атмосферного впливу. Виявлені закономірності можуть бути науковою основою для подальшого вдосконалення технологій отримання полімерних нанокompозитів із заданими експлуатаційними властивостями та їх використання при виготовленні будівельних матеріалів, захисних покриттів, кабельної ізоляції тощо. Запропоновані підходи до модифікації ПВХ нанодисперсним карбоновим наповнювачем впроваджені у виробництво на базі ТОВ «БАЗИС 2011» (м. Вінниця) для виготовлення профілю гофрованої труби як системи кабелепроводів.

Апробація результатів дослідження. Результати роботи обговорювались на міжнародній науковій конференції:

1. **Волченков І. В., Жильцова С. В.** Вплив концентрації карбонового нанонаповнювача на ударну в'язкість ПВХ-композитів та їх стійкість до ультрафіолетового опромінення. *Хімічні проблеми сьогодення (ХПС-2026): збірник тез доповідей IX Міжнародної (XIX Української) наукової конференції студентів, аспірантів і молодих учених, 24–26 березня 2026 р., м. Вінниця / Донецький національний університет імені Василя Стуса; редколегія: С. В. Жильцова (відп. ред.) [та ін.]. Вінниця, 2026. С. 143.*
<https://jhps.donnu.edu.ua/article/view/19726>

Структура роботи. Магістерська робота складається зі вступу, 3 розділів, висновків, списку використаних джерел та літератури із 30 найменувань, 2 додатків. Обсяг основної частини роботи (без списку використаних джерел і додатків) становить 54 сторінки. Загальний обсяг роботи становить 62 сторінки.



РОЗДІЛ 1. ПОЛІМЕРНІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ПОЛІВІНІЛХЛОРИДУ І КАРБОНОВИХ НАНОНАПОВНЮВАЧІВ

1.1 Вуглецеві наповнювачі як модифікатори полімерів

Полімерні композити, армовані вуглецевими наноматеріалами, викликають інтерес через їх стійкість і поширеність, а також через те, що вони забезпечують тісну взаємодію з матрицею, необхідну для покращення термічних, механічних і фізичних характеристик полімерів. Існують три основних типи карбонových наповнювачів і, відповідно, композитів на їх основі. Перший тип – це двовимірні (2D) армовані наноматеріали, включаючи відновлений оксид графена. Другий клас вуглецевих нанонаповнювачів – це одновимірні (1D) армовані вуглецеві нанотрубки, включаючи одностінні і багатостінні. Ці 1D нанонаповнювачі використовуються як наноармуючі матеріали в полімерних матрицях для досягнення кращих фізико-механічних характеристик нанокомпозитів. Третя група вуглецевих нанонаповнювачів – нульмірні (0D), що включають вуглецеві квантові точки, фулерен і технічний вуглець (вуглецева сажа), які мають різні форми частинок [5]. На рис. 1.1 наведено схематичні зображення різних типів вуглецевих наповнювачів залежно від їх розмірності.

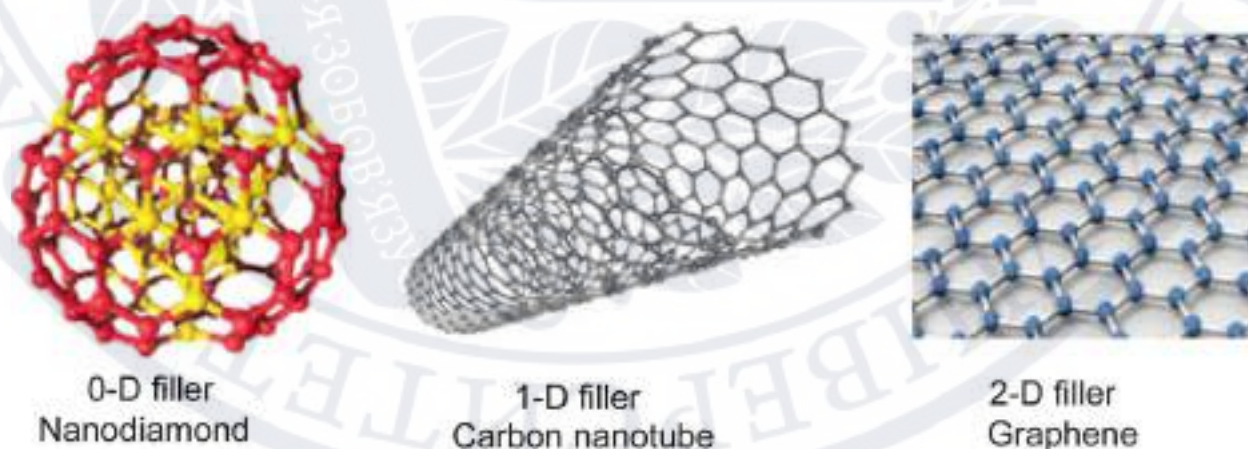


Рисунок 1.1. Різні типи вуглецевих нанонаповнювачів [6]

У порівнянні з мікро- і макронаповнювачами, додавання нанонаповнювачів у полімерну матрицю з тим самим вмістом компонента кардинально змінює властивості полімерних композитів через високий ступінь контакту між нанонаповнювачами і полімерами, відомий як «наноефект» [7].

Технічний вуглець (ТВ, англ. – *carbon black*) – цікавий матеріал з промислової точки зору, який використовується головним чином як компонент композитів, що має властивості армуючого матеріалу і пігменту. Технічний вуглець являє собою штучний аморфний матеріал, що складається з тонкого чорного порошку майже елементарного вуглецю у формі сферичних частинок, їх агрегатів і агломератів. Його чудова здатність забарвлюватися, електропровідність, а також стійкість до атмосферних впливів і хімічних речовин роблять ТВ потужним матеріалом, що використовується в найрізноманітніших галузях. Як видно з рис. 1.2, матеріалознавство, хімія, наука і технології, а також інженерія є тими напрямками, де такі наноматеріали демонструють більш високу представленість, охоплюючи більше 58 % від їх глобального застосування [8].

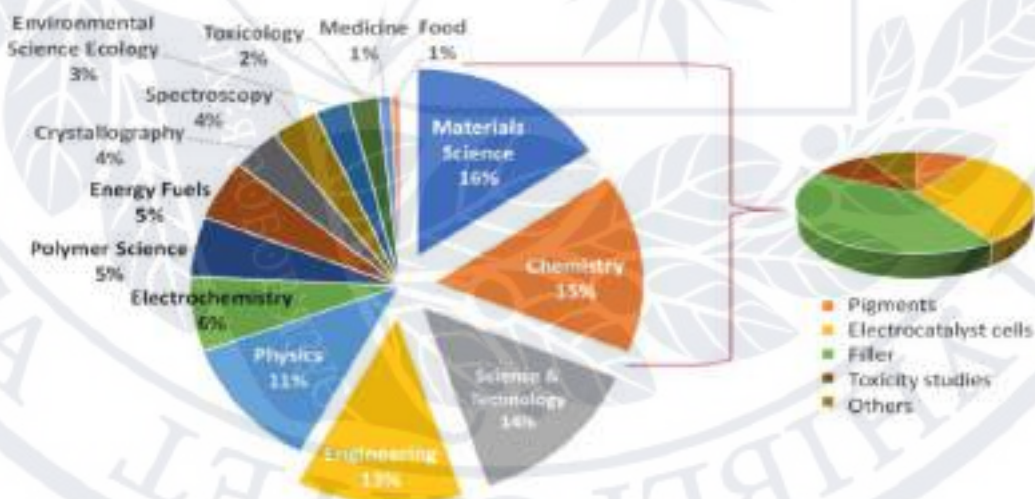


Рисунок 1.2. Схематичне зображення напрямів використання наноматеріалів з ТВ за результатами пошуку на Web of Science за ключовими словами «Carbon Black Nanoparticles» у період 2016–2021 [8]

ТВ є найдешевшим і наймасштабнішим промислово виробленим нановуглецем. Він значно перевершує ринок вуглецевих нанотрубок, а при середній ціні 1 долар США/кг він значно дешевший за найдешевший сорт вуглецевих нанотрубок, представлений на даний час на ринку, – 600 доларів США/кг, за даними дослідження [9]. Цей контраст ще більше посилюється тим, що графенові нанопластики і фулерен C_{60} продаються за ціною близько 10 000 і 35 000 доларів США/кг відповідно. Таким чином, там, де доступність у великих масштабах, вартість матеріалів і необхідні властивості відповідають властивостям інших алотропів вуглецю, ТВ видається привабливим варіантом. ТВ представляє велике сімейство матеріалів, про що свідчить кількість комерційних продуктів, доступних на ринку, що охоплюють широкий спектр технологічних специфікацій та експлуатаційних вимог. Приклади ключових світових виробників з деякими з їх основних торгових марок та серій: Cabot Corporation (BLACK PEARLS®, EMPEROR®, MONARCH®, REGAL®, VULCAN®), Birla Carbon (RAVEN®, CONDUCTEX®, ULTRA®, серії BC і N), Continental Carbon (серії N, CL, E, JE, LH, Satin і SBX), Orion Engineered Carbon (CORAX®, PUREX®, DUREX®, NEROX®, PRINTEX®), Imerys Graphite & Carbon (Super S®, Super P®, ENSACO®) [9].

Матеріали на основі технічного вуглецю (CAS 1333-86-4) утворюються при суворо контрольованому термічному розкладанні багатого вуглецем сировини в інертній (піроліз) або збідненій киснем (часткове згоряння) атмосфері. Таким чином, виробляються агрегати вуглецевих наночастинок (рис. 1.3).

Спеціальні марки технічного вуглецю використовують як чорні пігменти в пластмасах, фарбах і чорнилах, як стабілізатори проти ультрафіолетового (УФ) випромінювання для запобігання деградації полімерів під дією видимого та УФ-світла, а також як наповнювачі для надання полімерним матеріалам електропровідності в антистатичних і провідних застосуваннях [10].

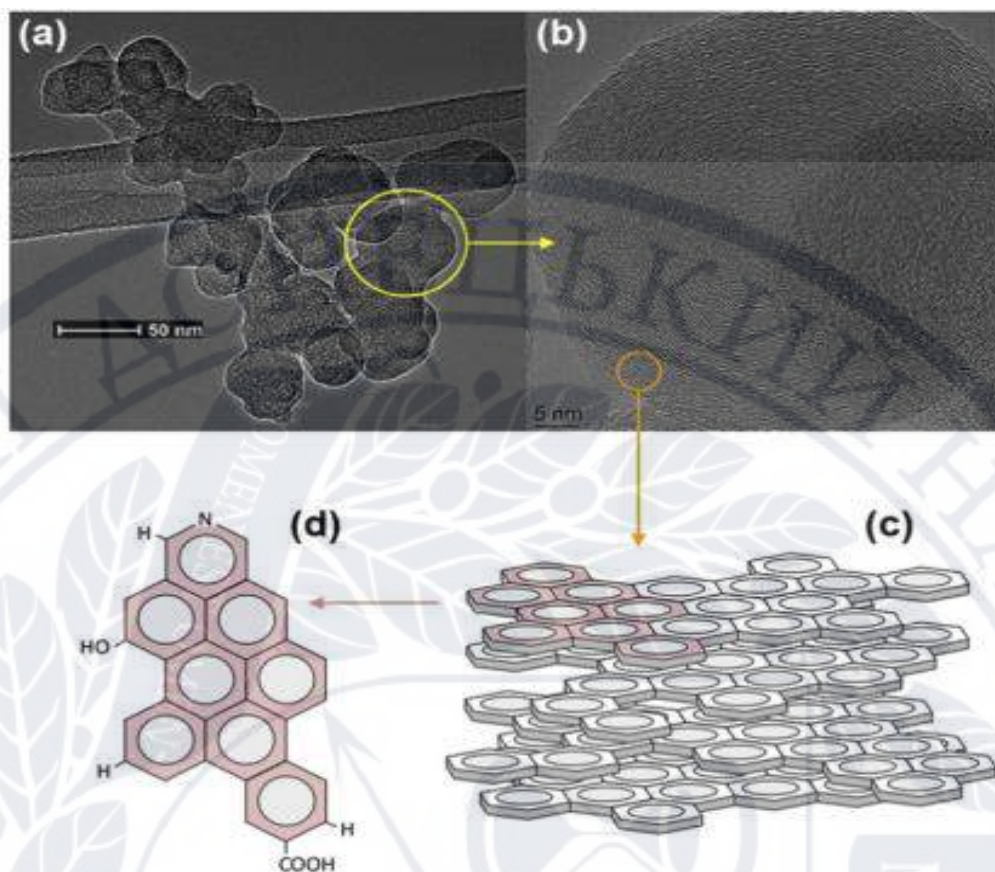


Рисунок 1.3. TEM-зображення (a) агрегату та (b) первинної частинки сажі Cabot REGAL® 250. Ілюстративне зображення (c) гіпотетичної графітової базової структурної одиниці та (d) спрощеного прикладу атомів гідрогену і гетероатомів [9]

ТВ по суті є найстарішою комерційно доступною формою вуглецевого наноструктурованого матеріалу. Процес виробництва ТУ принципово відрізняється від процесу отримання чорного вуглецю і сажі, які обидва є результатом неповного ненавмисного спалювання джерел вуглецю, таких як викопне паливо, біопаливо і біомаса. Пічна сажа являє собою свіжозібраний порошок з дуже низькою насипною щільністю (20–60 г/л), який пресують або гранулюють для зручності використання. Пічні сажі мають питому поверхню від 20 до 150 м²/г, але для пігментних пічних саж можна досягти значень до 300 м²/г. Пічні сажі можуть містити значну кількість кисню, золи та летких речовин із підсумковим вмістом вуглецю не нижче 97 %. Залишки золи зазвичай виникають через солі, присутні у воді, що використовується для

гасіння процесу піролізу, або навмисно додаються для контролю структури вуглецевої сажі. Елементи водню, азоту і сірки також можуть бути виявлені у вуглецевій сажі залежно від використовуваної сировини. Водень С–Н знаходиться на краю вуглецевих шарів, тоді як азот і сірка зазвичай інтегровані в ароматичну структуру шару. Кисневі групи, такі як $-\text{COOH}$, $-\text{C}=\text{O}$ і $-\text{OH}$, присутні на поверхні залежно від використання повітря в процесі виробництва. Термічні та ацетиленові сажі натомість складаються з $>99\%$ вуглецю. Деякі марки термічної сажі можуть бути виготовлені з дуже великих частинок з питомою поверхнею в кілька $\text{m}^2/\text{г}$ (рис. 1.4), тоді як деякі пігментні марки можуть бути представлені у вигляді порошків з питомою поверхнею в тисячі $\text{m}^2/\text{г}$ [9].

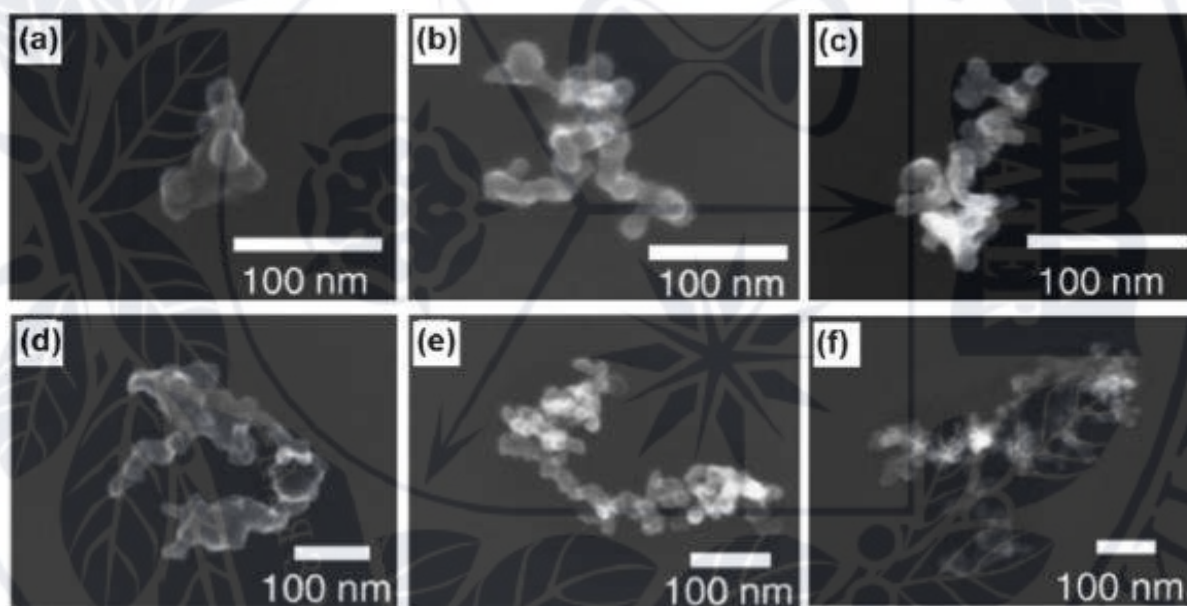


Рисунок 1.4. Агрегати ТВ різних розмірів, отримані в результаті піролізу етилену при різних температурах, зображення SEM агрегатів розміром 100 нм (a, b, c) і 180 нм (d, e, f), отриманих при температурі приблизно $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ [9]

Технічний вуглець є універсальним інгредієнтом для термопластичних компаундів завдяки своїй здатності покращувати електропровідність, захищати від ультрафіолетового випромінювання, а також забезпечувати колір

і непрозорість продукту [11]. З точки зору механічних властивостей, дисперсність технічного вуглецю та міцність міжфазної поверхні матриця–нанонаповнювач є двома ключовими факторами, що визначають механічні властивості. Модифікація поверхні є основним засобом поліпшення дисперсності нанонаповнювачів і міцності міжфазної поверхні [12].

Таким чином, використання технічного вуглецю відкриває можливості для створення нових високоефективних полімерних матеріалів із заданими властивостями для промислового та високотехнологічного застосування.

1.2 Полівінілхлорид як матриця для виготовлення полімерних композиційних матеріалів

ПВХ є універсальним матеріалом, який можна переробляти різними способами, такими як пресування, екструзія, лиття під тиском та нанесення покриттів. Його широко використовують для виготовлення плівок, штучної шкіри, ізоляції проводів і кабелів, жорстких виробів, підлогових покриттів, меблів, спортивного інвентарю тощо. Вироби з ПВХ зазвичай поділяють на три категорії: напівжорсткі, жорсткі та м'які. Жорсткі та напівжорсткі вироби виготовляють без пластифікаторів або з їх незначною кількістю, тоді як м'які вироби містять значну кількість пластифікаторів. Додавання пластифікаторів дозволяє знизити температуру склування, що полегшує переробку за нижчих температур, а також підвищує гнучкість молекулярних ланцюгів і пластичність, завдяки чому можна отримувати м'які, гнучкі вироби, придатні для використання за кімнатної температури [13].

ПВХ являє собою білий, досить жорсткий матеріал, який характеризується високою стійкістю до дії води, атмосферних впливів, корозії та хімічних реагентів, що утворюються під час механічних впливів. Відповідно до номенклатури IUPAC, стандартною назвою ПВХ є полі(1-хлоретен). За ступеня полімеризації в межах 500–1500 він демонструє лінійну будову полімерних ланцюгів з переважно атактичною конфігурацією. Це відповідає умовному діапазону молекулярної маси приблизно 31 000–

94 000 г/моль. Полівінілхлорид отримують методом радикальної полімеризації, його полімеризують у промислових масштабах різними методами: суспензійним (близько 80 % ринку), емульсійним (~10–15 %), в масі (~10 %), в розчині (~1 %) [13].

1.2.1 Модифікатори ПВХ

ПВХ протягом тривалого часу залишається одним із найпоширеніших полімерних матеріалів. Його поділяють на дві основні категорії: жорсткий (непластифікований), який застосовують в автомобілебудуванні, медицині, електроніці, будівництві; та гнучкий (пластифікований), що використовується для виготовлення кабелів, проводів, плівок, листів, труб, виробів побутової техніки, ємностей тощо. Через свої механічні властивості чистий ПВХ потребує введення добавок для покращення технологічності та адаптації до конкретних застосувань. Найчастіше для цього використовують пластифікатори, наповнювачі, термостабілізатори, модифікатори ударної міцності та пігменти [13].

Одні з широко застосовуваних пластифікаторів – фталатні. ПВХ відносно твердий і крихкий але при додаванні пластифікаторів він стає гнучким і еластичним за рахунок вбудовування молекул пластифікатора між ланцюгами полімеру, зменшуючи міжмолекулярні взаємодії [14].

Як термостабілізатори можуть використовуватися суміші свинцевих органічних солей або інші специфічні сполуки свинцю, які збільшують стійкість до термічної деградації ПВХ, нейтралізуючи виділення HCl при нагріванні і в такий спосіб запобігаючи руйнуванню полімеру [15].

Полівінілхлорид є високочутливим до дії ультрафіолетового випромінювання, яке при тривалій дії може спричиняти значну фотодеградацію. Процес фотодеградації розпочинається з поглинання УФ-випромінювання специфічними хромоформними центрами в полімері, зокрема алільним хлором і структурними дефектами (рис. 1.5).

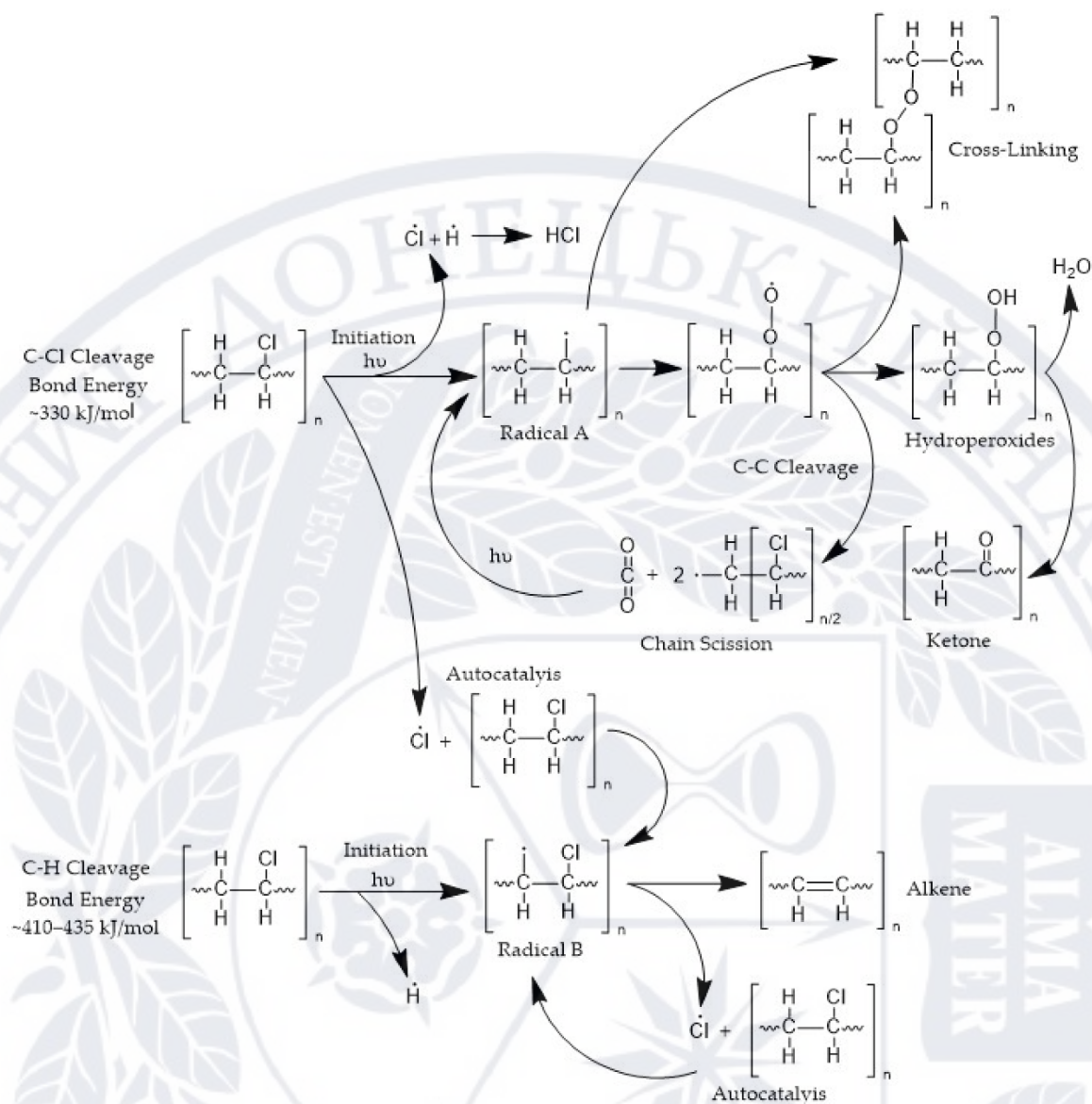


Рисунок 1.5. Фотодеградація ПВХ [25]

Для зниження впливу таких процесів на експлуатаційні характеристики матеріалів на основі ПВХ до їх складу часто вводять фотостабілізатори. УФ-абсорбери – це стабілізатори, здатні знижувати швидкість фотоокислення полімерних матеріалів шляхом поглинання УФ-випромінювання. Абсорбери розсіюють енергію у вигляді тепла з перебігом часу з безпечною для полімерів швидкістю. Вони блокують утворення вільних радикалів, які виникають на ранніх стадіях деградації. Найбільш поширеними промисловими УФ-поглиначами є оксид титану, технічний вуглець, бензофенони та триазоли [16].

Карбонат кальцію є найпоширенішим наповнювачем для ПВХ. Зазвичай він піддається поверхневій обробці стеариновою кислотою з утворенням шару

стеарату кальцію на поверхні частинок. Це забезпечує покращення перероблюваності та диспергування (а отже, і механічних властивостей), а також підвищення вологостійкості, що сприяє покращенню електричних характеристик. Крейдяні наповнювачі широко використовуються і в пластифікованому ПВХ, де вимоги до розміру частинок менш жорсткі. У таких системах можливе введення більшої кількості наповнювача. Вони широко застосовуються у виробництві проводів і кабелів, де разом з іншими добавками сприяють зменшенню виділення HCl під час пожежі. GD{-пластизолі зазвичай містять високі концентрації наповнювача з економічних міркувань, однак при цьому повинні зберігати відповідні показники в'язкості та реології для обраної технології переробки. Для цих застосувань доступні спеціальні марки карбонату кальцію [17].

Стеаринова кислота є однією з найбільш часто використовуваних поверхнево-активних речовин (ПАР) для наповнювачів на основі карбонату кальцію через її низьку вартість і ефективність. Вона покращує гідрофобні властивості CaCO_3 , прикріплюючи гідрофобного хвоста до поверхні частинок CaCO_3 за допомогою хімічної реакції. Це утворює моношар між стеариновою кислотою і CaCO_3 , що підсилює взаємодію частинок з матрицею і знижує агломерацію покритих ПАР частинок CaCO_3 . Дослідження показують, що композитні матеріали з покритим стеариновою кислотою CaCO_3 мають кращі механічні властивості в порівнянні з непокритим [11].

Вуглецеві нанонаповнювачі є перспективними для одержання ПВХ композиційних матеріалів. Вони мають істотний вплив на механічні, електричні, термічні властивості полімерних композитів. Крім того, вони здатні підвищити стійкість до УФ-випромінювання, збільшити електропровідність.

1.2.2 Диспергування і механічні методи змішування ПВХ-композицій

Ключовою проблемою при виробництві нанокompозитів є досягнення однорідної дисперсії нанонаповнювача в полімерній матриці, яка відіграє

фундаментальну роль для властивостей нового полімерного нанокompозиту і впливає на міжфазну поверхню нанонаповнювач–полімер. Багато досліджень присвячено поліпшенню диспергування нанонаповнювача з використанням методів фізичної та хімічної модифікації [18].

Однією з ключових проблем полімерних нанокompозитів залишається нерівномірний розподіл наповнювача в полімерній матриці, що часто зумовлено схильністю частинок до агломерації та їх недостатньою сумісністю з полімером. Серед можливих шляхів вирішення цієї проблеми розглядаються оптимізація параметрів процесу, а також комбінування різних механохімічних методів і модифікація поверхні наповнювача.

Нанокompозити на основі ПВХ з нанонаповнювачами отримують кількома методами. Високошвидкісне змішування на спеціальному обладнанні (рис. 1.6) виділяється як найбільш передовий метод розробки полімерних нанокompозитів. Він базується на застосуванні зсувних сил для досягнення трансформаційних змін у матеріалах. Високошвидкісне змішування має низку переваг, включаючи мінімальну фрагментацію матеріалу, масштабованість, низькі витрати на обслуговування і високу ефективність відшарування і диспергування. Більш того, високошвидкісне змішування можна проводити і з розчинниками, і без них [19].



Рисунок 1.6. Обладнання для високошвидкісного змішування [19]

Метод змішування у розчиннику полягає в тому, що суспензія вуглецевого наповнювача (ВН) диспергується в розчині, який містить або полімерний прекурсор, або полімер, сумісний з розчинником. Процедура включає в себе розчинення полімеру і подальше диспергування наповнювача в розчині, як показано на рис. 1.7. Після досягнення однорідної суміші розчинник випаровується, або полімер осідає, що призводить до створення нанокompозитного матеріалу. Змішування розчину дає такі переваги, як кращий контроль над дисперсією ВН і можливість досягнення більш рівномірного розподілу в полімерній матриці. Крім того, цей метод застосовується до широкого спектру типів полімерів. Однак можуть виникнути проблеми при видаленні розчинника, що вимагає більше часу в порівнянні з такими методами, як змішування [20].

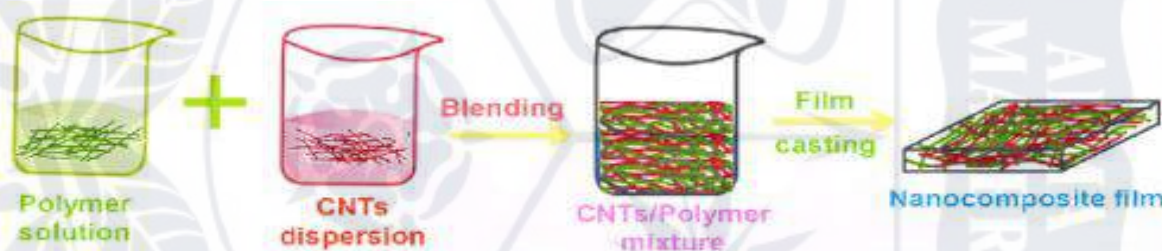


Рисунок 1.7. Процедура розчинення полімеру і подальшого диспергування ВН [20]

Змішування в розплаві є широко використовуваною технологією при виготовленні композитів на основі полімерів з ВН. Цей метод включає змішування ВН з полімерною матрицею при підвищеній температурі, зазвичай вище температури плавлення полімеру. У цьому процесі використовуються високі зсувні зусилля, що виникають під час змішування, для рівномірного диспергування і включення ВН в розплавлений полімер. Змішування в розплаві особливо підходить для термопластичних полімерів, де полімер можна плавити і обробляти багаторазово без значної деградації. Змішування в розплаві допомагає забезпечити рівномірний розподіл окремих ВН по всій

полімерній матриці, тим самим досягаючи однорідності. Такий рівномірний розподіл покращує механічні, електричні та термічні властивості отриманого композитного матеріалу на основі полімерів з ВН. На рис. 1.8. показаний типовий двошнековий екструдер, що використовується в процесі змішування розплаву композитів на основі полімерів з ВН [20].

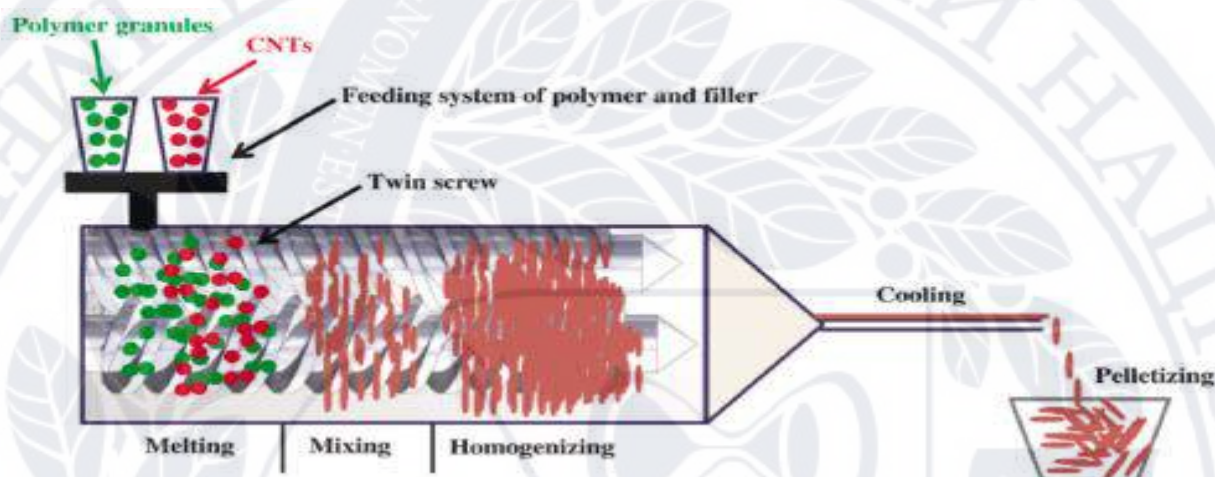


Рисунок 1.8. Двошнековий екструдер, що використовується в процесі змішування розплаву [20]

Таким чином, залежно від обраної системи та мети синтезу, можуть бути використані різні підходи до отримання полімерних композитів з вуглецевими наповнювачами.

1.4 ПВХ-композити, модифіковані вуглецевими наповнювачами

Композиційні матеріали на основі полівінілхлориду можуть мати різні експлуатаційні характеристики залежно від типу обраної полімерної сировини, введених модифікаторів та нанонаповнювачів, їх кількості та дисперсності. Суттєва зміна властивостей може бути забезпечена за рахунок використання нанодисперсних частинок, які забезпечують високу частку міжфазної поверхні в утвореній системі та суттєве покращення властивостей за умови рівномірного розподілу компонентів у полімерній матриці. З цією метою наповнювачі можуть бути хімічно модифіковані, до систем можуть

вводиться ПАР, застосовуватися функціоналізація полімерної складової тощо [21].

Одним із напрямів, над якими працюють дослідники композитів на основі ПВХ і вуглецевих наповнювачів, є вивчення їх сенсорних, магнітозахисних та електропровідних показників. Автори [22] одержували композитні плівки на основі полівінілхлориду, технічного вуглецю і вуглецевих нанотрубок методом фазового розділення, індукованого нерозчинником з наступною стадією набухання в розчиннику. Показано, що використаний підхід дозволяє синтезувати матеріали з високою електропровідністю та ефективністю екранування електромагнітних завад, що робить їх привабливими для використання у гнучкій електроніці та комунікаційних пристроях.

ПВХ-композити, наповнені вуглецевими нанотрубками, можуть бути використані як сенсорні матеріали. У роботі [23] запропоновано гелевий електрод на основі композиту ПВХ і вуглецевих нанотрубок для створення двофункціональних (актуаторно-сенсорних) пристроїв із високою продуктивністю та стабільністю. Автори порівнювали три типи карбонових наповнювачів (технічний вуглець, графен та вуглецеві нанотрубки) на формування молекулярної сітки гелю і встановили, що найвищі показники електропровідності забезпечували системи на основі нанотрубок, які мали високу чутливість, роздільну здатність та оптимальну динамічну відповідь.

Guo з співавторами також досліджували ПВХ композити як потенційні сенсорні матеріали [24], використовуючи як наповнювач технічний вуглець. Їм вдалося отримати систему на основі ПВХ/ТВ для формування чутливого до тиску шару мікрогнучкого сенсора методом трафаретного друку. Показано, що робота сенсора практично не залежить від температури, при цьому він характеризується високою чутливістю, швидким часом відгуку та доброю стабільністю.

Крім електропровідності композити, наповнені карбоновими частинками, мають підвищені механічні характеристики. Автори [1] одержували зразки на основі відновленого оксиду графену і ПВХ і спостерігали зміну деформаційно-

міцносних характеристик при варіюванні вмісту наповнювача. Показано, що при низькому вмісті оксиду графену (0,2 мас. ч. відносно 100 мас. ч. ПВХ) для композиту спостерігається зростання міцності на розрив, відносного подовження при розриві, модуля Юнга та в'язкості руйнування на 100,1 %, 102,4 %, 179,1 % і 432,3 % відповідно. Крім того, композит з вищим вмістом наповнювача (оксид графену:ПВХ = 1:100) було використано як функціональний мастербатч для комерційного деревно-полімерного композиту на основі ПВХ. Встановлено, що за вмісту наповнювача лише 0,07 мас.% відносно деревного композиту міцність при розтягу, подовження при розриві, модуль Юнга та в'язкість руйнування WPC зростають на 62,4 %, 75,4 %, 57,2 % і 236,3 % відповідно. Запропонований підхід є простим способом отримання міцних і тривких композитів графен/ПВХ і має перспективи для промислового застосування.

Деякі автори спостерігають протилежні залежності для систем, в яких як наповнювач використано інший тип вуглецевих наночастинок. У статті [18] наведено результати досліджень ПВХ композитів, модифікованих гібридним вуглецевим наповнювачем на основі вуглецевих волокон та багатостінних вуглецевих нанотрубок. Гібридний наповнювач отримували розчинним методом із використанням полівінілацетату як зв'язувальної речовини. Автори показали, що композити характеризуються підвищеною взаємодією ПВХ–наповнювач і водночас неоднорідне зчеплення наповнювача з полімером, яке демонструють мікрофотографії сканувальної електронної мікроскопії (рис. 1.9). Автори зазначають, що додавання полівінілацетату сприяло підвищенню адгезії між матрицею і наповнювачем, що може позитивно позначитися на механічних властивостях композитів. Проте аналіз властивостей отриманих систем показав зниження міцності на розрив та відносного подовження при розриві, а також ударної в'язкості композитів порівняно з немодифікованим ПВХ.

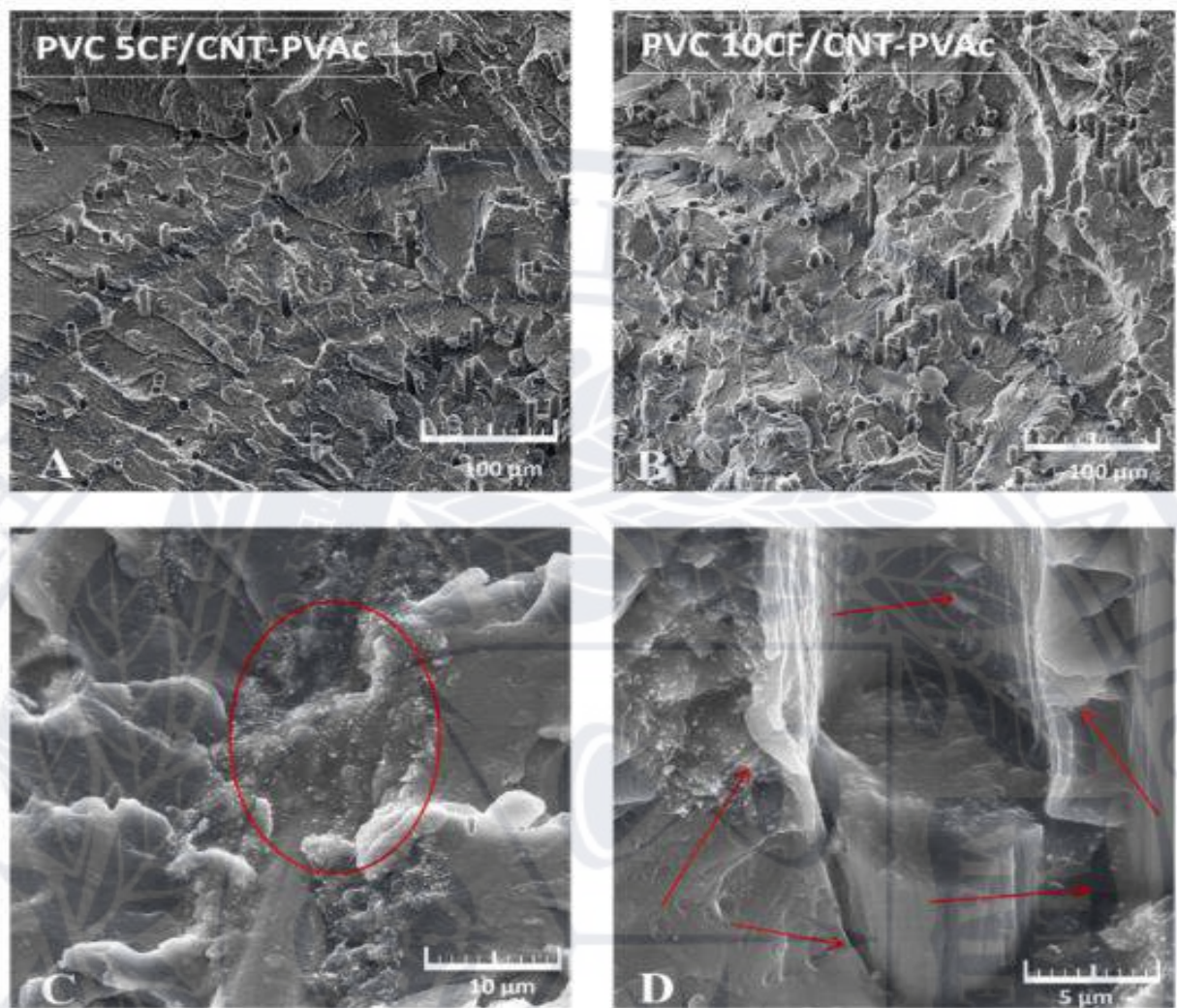


Рис. 3. Мікрофотографії сканувальної електронної мікроскопії криогенних зламів ПВХ-композитів з гібридним наповнювачем. (А) зразок з 5 % вуглецевих волокон у гібридному наповнювачі при збільшенні 500×; (В) зразок з 10 % вуглецевих волокон у гібридному наповнювачі при збільшенні 500×; (С) межа поділу волокно–матриця при збільшенні 5000×; (D) межа поділу волокно–матриця при збільшенні 10 000× [18]

У роботі [4] проаналізовано електричні властивості, механічні характеристики та реологічну поведінку трьох типів композитів полівінілхлориду з високим вмістом пластифікатора, наповнених пористим надпровідним технічним вуглецем, пластинчастим розширеним графітом та трубчастими багатостінними вуглецевими нанотрубками. Автори показали, що залежно від типу наповнювача змінюється значення порогів електричної

та реологічної перколяції зразків, вищі значення яких мали системи з вуглецевими нанотрубками, що мали найвищу питому поверхню. Водночас, через низьку дисперсність розширений графіт не спричиняє ні в'язкопружної, ні електричної перколяції в композитах у діапазоні 0–9 об.%. Автори дослідили також вплив вмісту наповнювачів різних типів на міцність на розрив і відносне подовження при розриві. Показано, що зі зростанням об'ємного вмісту частинок ці показники суттєво знижуються для всіх систем, крім композитів з вуглецевими нанотрубками, для яких спостерігається незначне зростання міцності на розрив, яке автори пов'язали з можливою орієнтацією наповнювача.

Важливою характеристикою систем, наповнених ТВ, є їх стійкість до дії УФ-випромінювання. Автори дослідження [25] проаналізували деградацію композитів полівінілхлориду, наповнених технічним вуглецем, під дією УФ-В випромінювання. Після 500 год експозиції матеріал продемонстрував зниження електричної міцності на 30,13 %, збільшення шорсткості поверхні на 27,6 % та формування значної кількості мікропітингів, що свідчить про суттєве фізико-хімічне руйнування. Деградація відбувалася за трифазним кінетичним механізмом: початкова індукційна стадія, автокаталітичне прискорення та стадія стабілізації, зумовлені розвитком радикальних процесів і фотоокиснення, що підкреслює складну роль УФ-В випромінювання у фотодеградації оболонок кабелів. Автори відзначають, що технічний вуглець, який традиційно вводять як УФ-стабілізатор завдяки його здатності поглинати та розсіювати ультрафіолетове випромінювання, у цій системі, ймовірно, виконує подвійну роль. З одного боку, підкреслюється його здатність до гасіння радикалів, з іншого, нерівномірність розподілу в полімерній матриці та агрегація частинок можуть призводити до утворення локальних термічних «гарячих точок», які прискорюють фотодеградацію.

Таким чином, композиційні матеріали на основі ПВХ, наповненого карбоновими наночастинками, є перспективними наносистемами з різними напрямками застосувань. Технічний вуглець демонструє високий потенціал для

покращення механічних, електричних властивостей у комбінації з наданням УФ-стійкості. Водночас, треба враховувати рівномірність розподілу нанонаповнювача, його вміст і дисперсність, яку здатні суттєво вплинути на характеристики кінцевого матеріалу. Важливими є підбір компонентного складу ПВХ-композитів та підходу до приготування зразків для забезпечення високих показників і максимального використання потенціалу наповнювача. Варто відзначити невисоку кількість наукових публікацій з вивчення властивостей ПВХ-композитів, для одержання яких було використано технічний вуглець, а також неоднозначність результатів щодо УФ-стійкості подібних систем. Тому метою даного дослідження було встановлення залежності між дисперсністю та вмістом вуглецевої сажі (технічного вуглецю) та стійкістю ПВХ-композитів до дії ударних навантажень і УФ-випромінювання.

РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1 Об'єкти та матеріали дослідження

Для отримання нанокompозиту на основі ПВХ було використано суміш речовин.

Суспензійний ПВХ-гомополімер $(-\text{CH}_2-\text{CHCl}-)_n$ середньої молекулярної маси ONGROVIL S-5258 виробництва BorsodChem Zrt (Угорщина). K-value = 57–59, ефективна густина 550–610 кг/м³, розподіл частинок за розмірами не вище 1 % більше 0,250 мм і не вище 5 % менше 0,063 мм, вміст залишкового вінілхлориду не більше 1 мг/кг, вміст летких речовин (max.) – 0,3 %, температура склування 75–85 °C, густина розплавленої смоли 1,41 г/см³ (дані виробника).

Як нанонаповнювачі використовувалася вуглецева сажа (технічний вуглець) з різним розміром частинок.

Технічний вуглець Carbon Black M6303 виробництва Sichuan Zhuoyu Yantang Technology Co., Ltd (Китай), що являє собою наноструктурований вуглець з графітоподібною структурою. Середній розмір частинок становить 34 ± 2 нм, насипна щільність – 408 кг/м³, питома площа поверхні – 82 м²/г, фарбувальна здатність – 100 %, рН водної суспензії – 7,2, вміст летких речовин – 1,2 % (дані виробника).

Технічний вуглець PowCarbon 3200F виробництва YongFeng Chemicals (Китай), що являє собою наноструктурований вуглець з графітоподібною структурою. Середній розмір частинок становить 29 ± 2 нм, насипна щільність – 180 кг/м³, питома площа поверхні – 130 м²/г, фарбувальна здатність – 110 %, рН водної суспензії – 10,0, вміст летких речовин – 1,6 % (дані виробника).

Додатково вводилися модифікуючі добавки для забезпечення необхідного рівня механічних властивостей, пластичності, термостабільності, УФ-стійкості тощо.

Оброблений тонкодисперсний карбонат кальцію NEOCARB 95C (CaCO_3) виробництва ТОВ «РЕНТА-ПРИМ» (Україна). Густина 2700 кг/м^3 , твердість – 3 за шкалою Мооса, вміст летких речовин (max.) при 105°C – 0,1 %, середній розмір частинок d_{50} – 1,4 мкм, рН (10-відсоткова водна суспензія, 25°C) – 9, вологість (при відвантаженні) – 0,3 %, абсорбція олії DOP – 21 г/100 г (дані виробника).

Однопакетний (комплексний) термостабілізатор Baeropan TX 355 виробництва Baerlocher GmbH (Німеччина). Суміш містить солі свинцю жирних кислот C_{12} – C_{18} та неорганічні солі свинцю, зокрема, триосновний сульфат свинцю $(\text{Pb}_3(\text{OH})_2(\text{SO}_4)_2)$. Вміст свинцю становить близько 33 % (за даними виробника).

УФ-абсорбер Tinuvin P виробництва BASF SE (Німеччина), що належить до класу бензотриазолів (2-(2H-бензотриазол-2-іл)-4-метилфенол, $\text{C}_{13}\text{H}_{11}\text{N}_3\text{O}$), CAS 2440-22-4. Вміст основної речовини становить 99,8 %, зольний залишок – 0,07 %, температура плавлення – 130°C (дані виробника).

Стеаринова кислота $\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$ виробництва Alemdar Kimya Endustrisi A.Ş. (Туреччина). Кислотне число 206–212 мг КОН/г, температура плавлення – 54 – 56°C (дані виробника)

Акриловий модифікатор переробки PARALOID K-120N на основі полі(метилметакрилату) $[-\text{CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)(\text{COOCH}_3)-]_n$ виробництва The Dow Chemical Company (США). Насипна щільність становить 400 – 440 кг/м^3 , середня молекулярна маса – $(0,6$ – $1,0) \cdot 10^6$ г/моль, температура склування – 91°C , вміст летких речовин – 0,5 % (дані виробника).

Фталатний пластифікатор DPHP Emoltene™ 100 ($\text{C}_{28}\text{H}_{46}\text{O}_4$) виробництва Perstorp (Швеція). Густина при 20°C становить 960 – 965 кг/м^3 , в'язкість при 20°C – 120 – $130 \text{ мПа} \cdot \text{с}$, молекулярна маса – 446,7 г/моль, кислотне число – 0,07 мг КОН/г, вміст основної речовини – 99,5 %, вміст води – $\leq 0,05$ % (дані виробника).

2.2 Методи та методики дослідження

2.2.1 Компаундування полімерних композиційних матеріалів

Композиційний матеріал на основі полівінілхлориду та технічного вуглецю отримували шляхом механічного змішування інгредієнтів у високошвидкісному нагрівально-охолоджувальному міксері. Для забезпечення рівномірного розподілу компонентів застосовували комбіновану систему вертикального гарячого та горизонтального холодного міксерів (рис. 2.1), що дає змогу формувати гомогенну суміш відповідно до заданої рецептури.



Рисунок 2.1. Комбінований нагрівально-охолоджувальний міксер типу М 1000 / К 4250 виробництва MTI Mischtechnik International GmbH (Німеччина) [26]

Завантаження та зважування сировини (ПВХ, нанонаповнювача та функціональних добавок) здійснювалися в автоматичному режимі відповідно до рецептури через впускні патрубки вертикального міксера із застосуванням пневмотранспортної системи. Конструктивні особливості його робочої ємності та геометрія змішувальних елементів у поєднанні з високою швидкістю обертання (526 об/хв) забезпечували інтенсивне перемішування та ефективну передачу механічної енергії, необхідної для диспергування нанонаповнювача в ПВХ-матриці, при цьому не спричиняючи надмірного механічного навантаження на матеріал.

По досягненні встановленої температури змішування 120 °С композиція вивантажувалася через гнучку муфту в горизонтальний міксер, що працював у режимі повільного обертання. Конфігурація змішувальних елементів у його ємності забезпечувала рух матеріалу у трьох площинах за типом кільцевого потоку, що сприяло ефективному тепловому контакту продукту з охолоджуваними поверхнями. Це дозволяло знизити температуру композиції до заданого значення 40 °С та стабілізувати її властивості перед подальшими технологічними операціями.

У ході дослідження було отримано два типи композиційних матеріалів: маточну суміш (як базову полімерну композицію) та мастербатч – концентровану композицію з технічним вуглецем як функціональним наповнювачем.

2.2.2 Виготовлення зразків композитів методом екструзії

Для дослідження впливу карбонового нанонаповнювача на властивості кінцевого композиту було обрано два варіанти його дозування в екструдер: маточна суміш і мастербатч у співвідношеннях 99:1 та 98:2 (мас. %). Дозування компонентів у процесі екструзії здійснювалося за допомогою об'ємних дозаторів, що забезпечувало підтримання заданого співвідношення складників композиції у розплаві. Процес компаундування проводили на

двошнековому конічному екструдері (рис. 2.2). Температурний профіль процесу наведено в табл. 2.1.



Рисунок 2.2. Двошнековий конічний екструдер CON 50 виробництва Theysohn Extrusionstechnik GmbH (Німеччина) [27]

Таблиця 2.1 – Розподіл температур у зонах екструдера та формуючого інструмента і технологічні параметри процесу

Параметр	Значення
Температура за зонами циліндра (ЗЦ1 / ЗЦ2 / ЗЦ3 / ЗЦ4), °C	165 / 170 / 180 / 185
Температура шнеків, °C	175
Температура адаптера, °C	185
Температура розплаву (фактична), °C	196
Частота обертання шнеків, об/хв	26,9
Тиск розплаву, бар	267
Частота обертання дозатора, об/хв	5,1

Маточну суміш вводили в екструдер через основний дозатор, тоді як мастербатч подавали у розплав полімерної матриці додатковим дозатором. У процесі екструзії, завдяки високому ступеню стиснення розплаву (понад 265 бар) та температурі 196 °С, відбувалося інтенсивне перемішування і додаткове диспергування наночастинок, що забезпечувало рівномірний розподіл нанонаповнювача в полімерній матриці та формування ПВХ-композиту з підвищеною однорідністю і стабільністю властивостей.

Отриманий розплав після виходу з формуючого інструмента екструдера надходив до формувального обладнання (рис. 2.3), де відбувалося формування профілю гофрованої труби товщиною 0,27–0,28 мм і діаметром 20 мм та її подальше охолодження у водяному середовищі при температурі 12–16 °С з метою стабілізації геометричних розмірів.



Рисунок 2.3. Гофраційна формувальна установка серії F 32/52-72 виробництва ITIB Machinery International S.r.l. (Італія) [28]

2.2.3 Дослідження механічних властивостей композиційних матеріалів

Оцінювання ударної в'язкості отриманих ПВХ-композитів проводили відповідно до вимог стандарту ДСТУ EN 61386-1:2017 (EN 61386-1:2008, IDT;

ІЕС 61386-1:2008, IDT) «Системи кабелепроводів. Частина 1. Загальні вимоги» [29], який регламентує методи випробування пластмасових систем трубопроводів та визначає здатність матеріалу протистояти ударним навантаженням.

Перед проведенням випробувань зразки кондиціонували за стандартною процедурою, що забезпечувало стабільність температури і вологості та гарантувало відтворюваність результатів.

Ударне навантаження прикладали за допомогою пристрою для визначення ударної міцності матеріалів під дією падаючого вантажу масою 1 кг (рис. 2.4), що забезпечує контрольовану енергію удару.

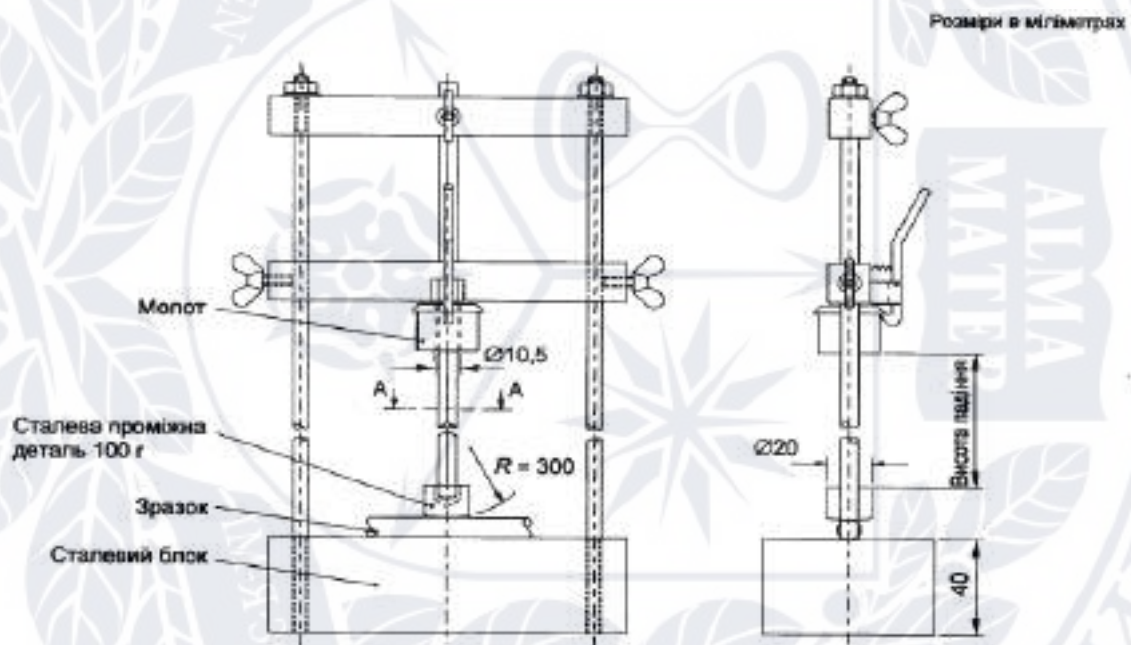


Рисунок 2.4. Пристрій для випробування на удар [29]

Під час випробування фіксували наявність руйнування або появи тріщин у зразках. Для кожного рецептурного варіанта проводили серію повторів, що дозволяло отримати статистично достовірні дані.

В ході випробувань визначали такі величини:

Висота руйнування (H , мм) – відстань від нижньої точки вантажу до поверхні зразка. Випробування проводили серією кидків із поступовою зміною висоти для визначення критичного діапазону.

Середня висота руйнування (H_{50} , м) – середньостатистичне значення висоти, розраховане як відношення сумарної висоти всіх результативних ударів до кількості зафіксованих руйнувань у серії.

Енергія руйнування (E , Дж) – робота, що виконується вантажем у момент удару. Розраховується за формулою:

$$E = m \cdot g \cdot H_{50}, \quad (2.1)$$

де m – маса вантажу (кг),

g – прискорення вільного падіння (9,81 м/с²),

H_{50} – середня висота руйнування (м).

Додатково визначали ударну в'язкість зразків після 4 годин УФ-опромінення. Опромінення проводили з використанням ртутно-кварцової лампи типу ДРТ-250 потужністю 250 Вт, яка є джерелом інтенсивного ультрафіолетового випромінювання.

2.2.4 Дослідження стійкості до дії ультрафіолету методом прискореного старіння

Прискорені кліматичні випробування зразків проводили відповідно до стандарту ASTM G154 [30] із використанням установки QUV Accelerated Weathering Tester. Як джерело випромінювання використовували лампи UVA-340. Випробування здійснювали за циклічним режимом: 8 год ультрафіолетового опромінення при температурі 50 °С та 4 год темної фази з конденсацією вологи при 45 °С. Загальна тривалість експозиції становила 2000 год.

Колірні характеристики зразків визначали за допомогою спектрофотометра відбиття X-Rite SP88 (X-Rite Inc., США) з інтегруючою сферою, геометрією вимірювання $d/8^\circ$ та стандартним освітлювачем D65.

Колір зразків вимірювали у системі CIELAB ($L^*a^*b^*$), де:

L^* – світлота (*Lightness*, 0 = чорний, 100 = білий);

a^* – зелений ↔ червоний;

b^* – синій ↔ жовтий.

За результатами випробувань визначали загальну зміну кольору зразка після кліматичного старіння (ΔE) і глянець поверхні (*gloss*).

ΔE обчислюють різницю кожного показника кольору «до» і «після» випробування за формулою (2.2):

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}. \quad (2.2)$$

Глянець вимірювали в абсолютних значеннях (GU, Gloss Units) з використанням приладу Glossmeter Sheen / TRI-Microgloss.

2.3 Техніка безпеки та вимоги охорони праці на об'єктах з переробки пластичних мас

Відповідно до НПАОП 25.0-1.01-12, безпечна організація технологічних процесів переробки полімерних матеріалів повинна забезпечувати захист працівників від небезпечних і шкідливих виробничих факторів, таких як підвищена температура, виділення шкідливих газів і парів, рухомі частини обладнання та підвищений тиск.

Технологічне обладнання (екструдери, термопластавтомати) повинно відповідати вимогам безпеки, бути справним і оснащеним захисними огороженнями, блокувальними пристроями та системами аварійного відключення. Забороняється експлуатація обладнання при відсутності або несправності захисних елементів.

Робочі місця повинні бути обладнані ефективними системами вентиляції для видалення шкідливих речовин, що утворюються під час термічної обробки полімерів. Рівень концентрації небезпечних речовин у повітрі робочої зони не повинен перевищувати гранично допустимих норм.

Працівники, які виконують роботи з переробки пластичних мас, повинні проходити інструктаж з охорони праці, навчання безпечним методам роботи та бути забезпечені засобами індивідуального захисту (захисні окуляри, рукавички, спецодяг, респіратори).

Під час виконання технологічних операцій необхідно:

- дотримуватись встановлених режимів температури та тиску;
- уникати контакту з нагрітими поверхнями обладнання;
- не допускати потрапляння сторонніх предметів у робочу зону машин;
- здійснювати очищення та технічне обслуговування обладнання тільки після його повного відключення від джерел енергії.

У випадку виникнення аварійної ситуації працівник зобов'язаний негайно зупинити обладнання, відключити його від електромережі та повідомити відповідальну особу. Подальші дії повинні здійснюватися відповідно до затверджених інструкцій з ліквідації аварійних ситуацій [31].

2.4 Вимоги до пожежної безпеки на об'єктах з переробки пластичних мас

Відповідно до вимог Правила пожежної безпеки в Україні, на підприємствах повинні бути впроваджені організаційні та технічні заходи, спрямовані на запобігання пожежам і забезпечення безпечної евакуації працівників.

Виробничі приміщення повинні бути оснащені:

- системами пожежної сигналізації та оповіщення;
- первинними засобами пожежогасіння (вогнегасники відповідного типу);
- справною вентиляцією для видалення горючих і токсичних парів;

- евакуаційними виходами, що відповідають нормам безпеки.

Електрообладнання, яке використовується в технологічних процесах (екструдери, термопластавтомати), повинно відповідати вимогам пожежної безпеки та мати справну ізоляцію. Забороняється експлуатація обладнання у разі виявлення перегріву, іскріння або пошкодження електричних мереж.

Зберігання сировини (полімерів, добавок, розчинників) повинно здійснюватися відповідно до встановлених норм, з урахуванням їх пожежонебезпечних властивостей. Легкозаймисті речовини необхідно зберігати у спеціально відведених місцях.

Працівники повинні проходити інструктаж з пожежної безпеки та знати:

- порядок дій у разі пожежі;
- місця розташування засобів пожежогасіння;
- правила користування вогнегасниками.

У разі виникнення пожежі необхідно негайно повідомити пожежну службу, відключити електроживлення, розпочати гасіння пожежі наявними засобами та організувати евакуацію людей [32].

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Одержання ПВХ-композитів

Синтез композиційних матеріалів на основі ПВХ, наповнених вуглецевою сажею, здійснювали поєднанням маточної суміші та мастербатчу. Маточна суміш слугувала базовою композицією, до складу якої входили компоненти, наведені в табл. 3.1. На її основі формувалася полімерна матриця, яка забезпечувала стабільні реологічні характеристики та однорідну структуру композиції.

Таблиця 3.1 – Композиція маточної суміші

Компонент	мас.ч.	кг	Вміст, %
ПВХ	100,00	100,00	71,94
Карбонат кальцію	25,00	25,00	17,99
Термостабілізатор	4,50	4,50	3,24
UV-абсорбер	0,50	0,50	0,36
Модифікатор переробки	1,50	1,50	1,08
Пластифікатор	7,50	7,50	5,40
Разом	139,00	139,00	100,00

Після отримання маточної суміші виготовляли мастербатч (табл. 2.2), до складу якого вводили технічний вуглець із частинками карбонової сажі різних розмірів: 34 ± 2 нм (система 1) та 29 ± 2 нм (система 2). Це дозволяло оцінити вплив гранулометричного складу нанонаповнювача на властивості зразка ПВХ-композиту.

Для покращення сумісності між матрицею ПВХ і технічним вуглецем застосовували модифікацію поверхні ПАР (стеариновою кислотою). З метою руйнування та видалення залишкових агломератів у системі реалізовували додаткові етапи розшарування та розділення. Для цього застосовували вібраційне сито з розміром комірки 300 мкм, що забезпечувало ефективне

відокремлення та видалення агломерованих частинок із композиційної суміші з підвищеним вмістом вуглецевого наповнювача.

Таблиця 3.2 – Композиція суміші мастербатч

Компонент	мас.ч.	кг	Вміст, %
ПВХ	100,00	100,00	80,00
Термостабілізатор	4,50	4,50	3,60
Стеаринова кислота	0,50	0,50	0,40
Технічний вуглець	20,00	20,00	16,00
Разом	125,00	125,00	100,00

Отриманий мастербатч у двох варіантах дозволяв регулювати концентрацію карбонового нанонаповнювача та змінювати розмір частинок вуглецю в кінцевому композиті, забезпечуючи точне дозування, відтворюваність результатів і можливість одержання матеріалів із заданими фізико-механічними та функціональними властивостями.

Для проведення досліджень було одержано зразки з масовим вмістом карбонового наповнювача 1 % і 2 % (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Компонентний склад зразків композитів на основі ПВХ

Номер зразка	Вміст ТВ, % (мас.)	Розмір ТВ, нм	Питома поверхня, м ² /г
Зразок 1-1	1	29±2	130
Зразок 1-2	1	34±2	82
Зразок 2-1	2	29±2	130
Зразок 2-2	2	34±2	82

Отримані експериментальні зразки гофрованої труби (рис. 3.1) на основі полівінілхлориду з вмістом ТВ 1 і 2 мас. % та розміром частинок 29±2 нм і 34±2 нм, а також із нормованими характеристиками (маса та товщина стінки),

були позначені ідентифікаційними номерами та піддані подальшим дослідженням для оцінки впливу концентрації та гранулометричного складу наповнювача на властивості ПВХ-композитів.



Рисунок 3.1. Зразки гофрованої труби 1-2 (зліва) і 2-2 (справа)

Наступним завданням було встановлення властивостей отриманих зразків в умовах, які відповідають експлуатації виробів, і виявлення впливу розміру наповнювача та його вмісту на стійкість до дії ударних навантажень та УФ-опромінення.

3.2 Оцінка механічних характеристик ПВХ-композитів в умовах динамічного навантаження

Опір композиційних матеріалів руйнуванню при високих швидкостях деформації визначається ударною в'язкістю системи. Введення технічного вуглецю як наповнювача змінює морфологію полімерної матриці, що впливає

на енергоємність процесу руйнування. Визначення енергії руйнування при вільному падінні вантажу дозволяє кількісно оцінити зміну механічних властивостей композиту під час випробувань на удар залежно від дисперсності наповнювача та його вмісту.

Отримані значення енергії руйнування E (табл. 3.4, рис. 3.2) дали можливість оцінити вплив концентрації та гранулометричного складу введеного через мастербатч карбонового нанонаповнювача на здатність ПВХ-композиту протистояти динамічним навантаженням. Порівняння результатів для серії зразків дозволило встановити зв'язок між кількістю та розміром нанонаповнювача, рівнем диспергування та ударною в'язкістю матеріалу.

Як видно з даних, наведених у таблиці, зразок 1-2 з концентрацією нанонаповнювача 1 мас.% і розміром частинок 34 нм має енергію руйнування 2,32 Дж, що є базовим показником ударної в'язкості для даної серії зразків.

Таблиця 3.4 – Результати визначення енергії руйнування отриманих зразків композитів

Зразок	Товщина зразка, мм	Висота руйнування, мм	Сумарна висота руйнування, мм	Кількість руйнувань, од.	E , Дж
1-1	0,28	320	640	2	3,28
		330	990	3	
		340	680	2	
		350	700	2	
		0,334*	3010**	9**	
1-2	0,27	220	220	1	2,32
		230	460	2	
		240	480	2	
		250	500	2	
		0,237*	1660**	7**	

Продовження Таблиці 3.4

Зразок	Товщина зразка, мм	Висота руйнування, мм	Сумарна висота руйнування, мм	Кількість руйнувань, од.	E, Дж
2-1	0,27	280	560	2	2,92
		290	580	2	
		300	1200	4	
		310	620	2	
		320	320	1	
		0,298*	3280**	11**	
2-2	0,28	190	190	1	2,11
		200	200	1	
		210	420	2	
		220	440	2	
		230	690	3	
		0,216*	1940**	9**	

* H_{50} , м

** сумарне значення параметра

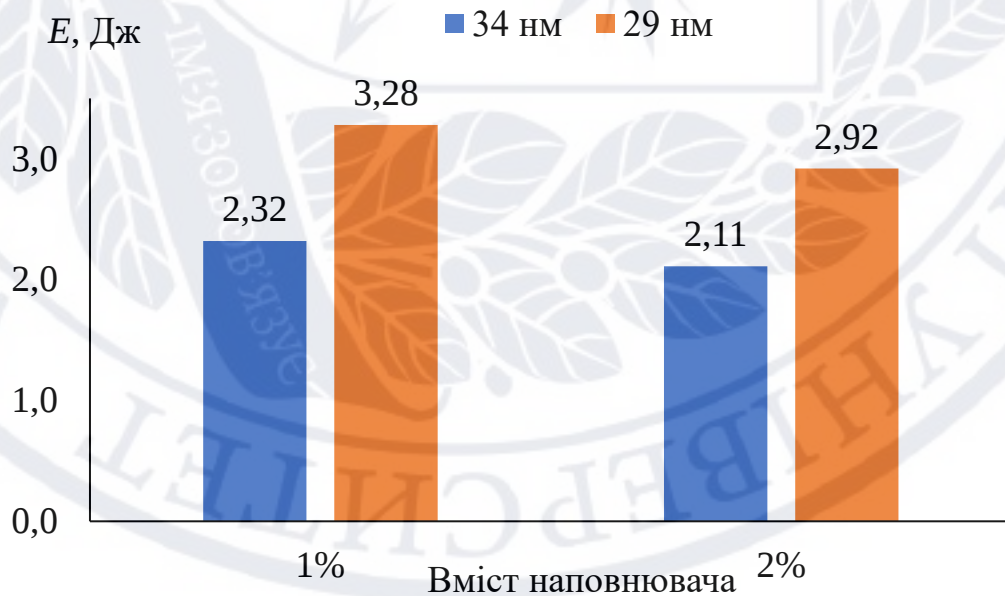


Рисунок 3.2. Вплив дисперсності та концентрації технічного вуглецю на енергію руйнування зразків

Збільшення вмісту наповнювача розміром 34 нм до 2 мас.% призводить до зниження H_{50} і, відповідно, енергії руйнування ПВХ-композитів на 9 %. Можливою причиною такого явища є утворення локальних концентрацій напружень внаслідок агломерації частинок.

Варто зазначити, що при зниженні розміру частинок до 29 нм спостерігається збільшення енергії руйнування до 3,28 Дж, що на 41 % більше, ніж у зразка 1-2, і свідчить про покращену ударну в'язкість. Отриманий зразок характеризується найвищою енергією руйнування серед проаналізованих. При цьому збільшення концентрації нанонаповнювача до 2 мас.% і в цьому випадку призводить до зниження енергії руйнування до 2,92 Дж, що на 11 % менше, ніж у зразка 1-1. Одночасно кількість руйнувань збільшилась з 9 до 11, що свідчить про посилення концентрації локальних напружень, пов'язане з можливою агломерацією наночастинок та збільшенням частки міжфазної поверхні в даному зразку порівняно з усіма проаналізованими вище.

З метою оцінки впливу компонентного складу композитів на їх стійкість до дії УФ-опромінення в умовах експлуатації зразки піддавалися опроміненню ртутно-кварцовою лампою протягом 4 год, після чого були проведені вимірювання стійкості до ударних навантажень. Результати досліджень наведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати визначення енергії руйнування модифікованих ПВХ-композитів після опромінення

Зразок	Товщина зразка, мм	Висота руйнування, мм	Сумарна висота руйнування, мм	Кількість руйнувань, од.	E, Дж
1-1	0,28	260	520	2	2,67
		270	1080	4	
		280	560	2	
		290	290	1	
		0,272*	2450**	9**	

Продовження Таблиці 3.5

Зразок	Товщина зразка, мм	Висота руйнування, мм	Сумарна висота руйнування, мм	Кількість руйнувань, од.	E, Дж
1-2	0,27	120	120	1	1,44
		130	260	2	
		140	280	2	
		150	450	3	
		160	160	1	
		170	170	1	
		180	180	1	
		0,147*	1620**	11**	
2-1	0,27	260	520	2	2,81
		280	280	1	
		290	580	2	
		300	600	2	
		310	310	1	
		0,286*	2290**	8**	
2-2	0,28	140	280	2	1,61
		150	300	2	
		160	320	2	
		170	170	1	
		180	180	1	
		190	190	1	
		200	200	1	
		0,164*	1640**	10**	

* H_{50} , М

** сумарне значення параметра

Видно, що після 4 год УФ-опромінення для всіх зразків спостерігалось зниження середньої висоти руйнування та енергії руйнування порівняно з неопроміненими зразками, більш виражене для зразків з вищим розміром частинок (див. табл. 3.5, рис. 3.3).

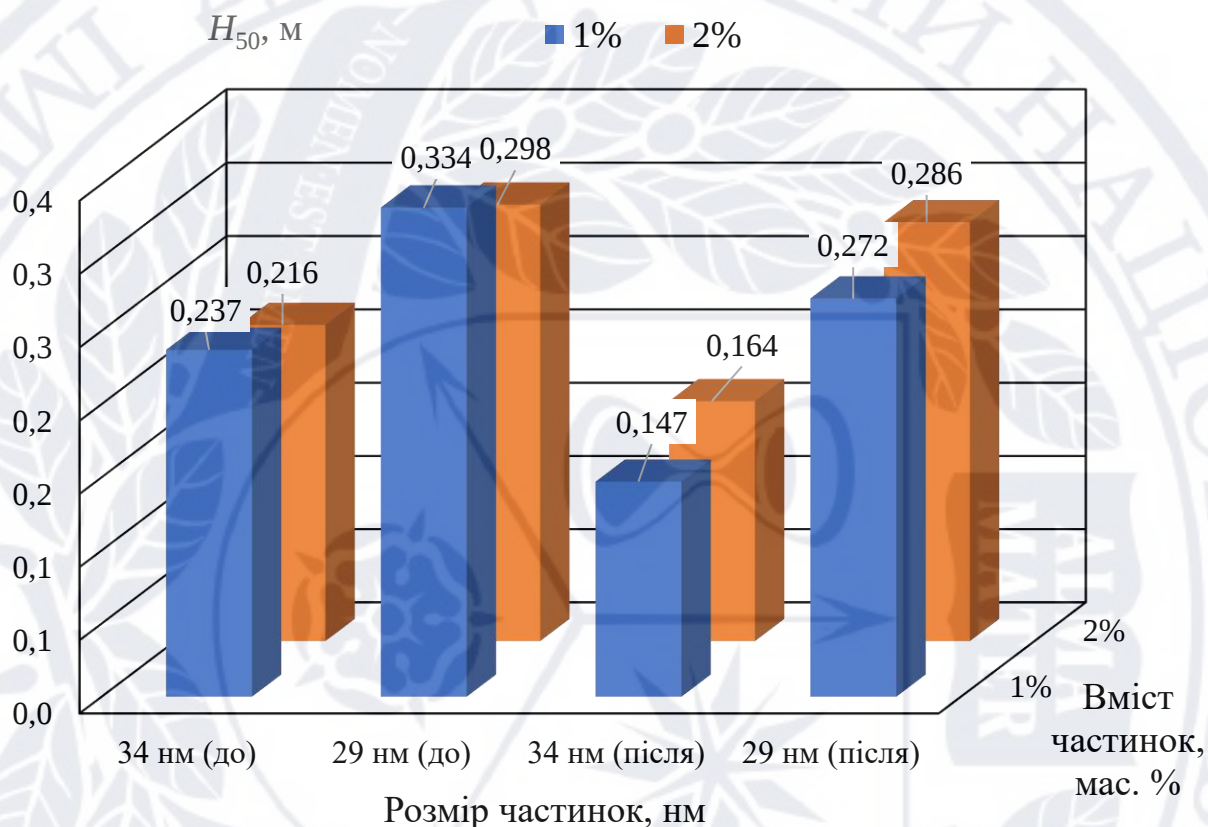


Рисунок 3.3. Залежність середньої висоти руйнування зразків композитів H_{50} від вмісту і розміру наповнювача до та після 4 год УФ-опромінення

Зразок 1-2 характеризується найменшою енергією руйнування і становить після опромінення 1,44 Дж у порівнянні з 2,32 Дж до опромінення. Зниження енергії руйнування на 38 % свідчить про деградацію матеріалу та зменшення його ударної в'язкості під впливом ультрафіолетового випромінювання. При збільшенні концентрації наповнювача до 2 мас.% також спостерігається тенденція до зниження енергії руйнування, проте негативний ефект виражений в меншому ступені: E зменшується з 2,11 Дж до 1,61 Дж, що становить приблизно 24 %.

Композит з меншим розміром частинок наповнювача характеризується вищими значеннями енергії руйнування (див. табл. 3.5, рис. 3.4). При цьому вплив УФ-опромінення зрізків значно впливає на ударну в'язкість матеріалу.

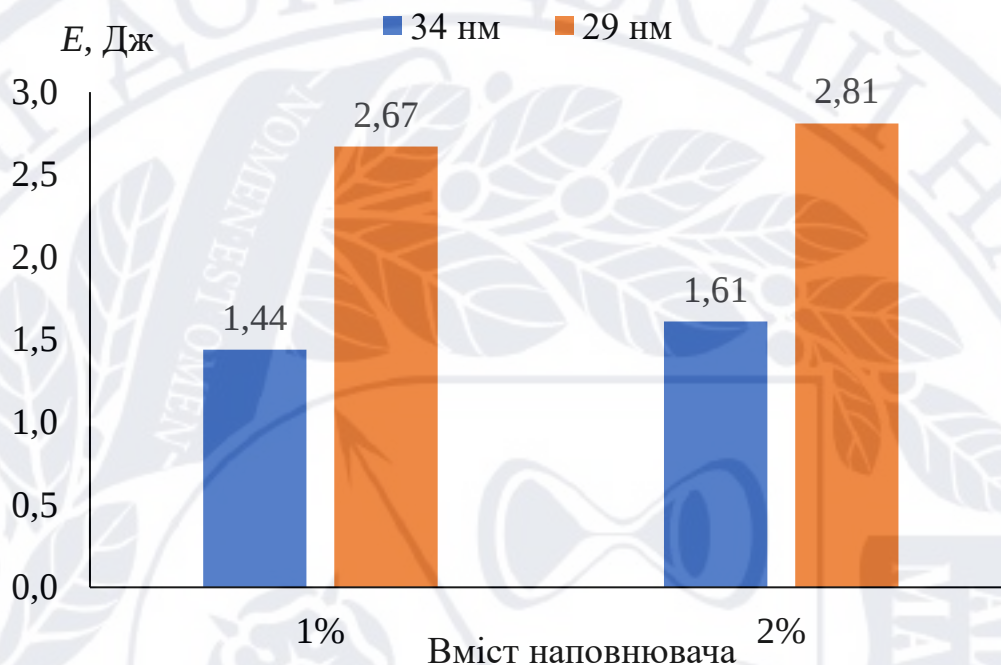


Рисунок 3.4. Вплив дисперсності та концентрації технічного вуглецю на енергію руйнування зразків

Зразок 1-1 демонструє зниження енергії руйнування з 3,28 Дж до 2,67 Дж, що відповідає зменшенню на 19%. Це вказує на вплив процесів фотодеструкції, однак збереження відносно високого рівня ударної в'язкості матеріалу порівняно з іншими зразками. Для аналогічної системи з вмістом наповнювача 2 мас.% (зразок 2-1) відносне зменшення E характеризується суттєво нижчим значенням на рівні 3,8 % (2,81 Дж після опромінення порівняно з початковим значенням 2,92 Дж). Найменше зниження цього показника серед усіх досліджених зразків свідчить про підвищену стійкість даної системи до впливу ультрафіолетового випромінювання. Зразок із 2 мас.% карбонового нанонаповнювача показав стабільніші характеристики

після опромінення, що може свідчити про його частковий стабілізуючий ефект.

Таким чином, ультрафіолетове опромінення негативно впливає на всі досліджені матеріали, спричиняючи зниження їх ударної в'язкості. В ході проведених досліджень було встановлено оптимальний склад композиту, що характеризується високою ударною в'язкістю та УФ-стійкістю: він відповідає системі з концентрацією наповнювача 2 мас.%, розмір якого становить 29 нм. Збільшення концентрації нанонаповнювача призводить до погіршення механічних властивостей матеріалу, незважаючи на відносну стабільність до дії УФ-випромінювання.

Зразки з наповнювачем демонстрували менший рівень деградації та зберігали свої властивості після УФ-опромінення значно краще, ніж чистий полівінілхлорид.

3.3 Результати прискорених кліматичних випробувань модифікованих ПВХ-композитів

З метою встановлення стабільності показників матеріалів в умовах експлуатації для зразків 1-1 і 2-1, які виявили кращі результати у випробуваннях на удар, проведено прискорені кліматичні випробування QUV (UV + волога / конденсація) за методикою ASTM G154. Результати динаміки зміни кольору та глянцевої поверхні наведено на рис. 3.5 і 3.6.

Аналіз результатів випробувань протягом 2000 годин показує, що обидва зразки продемонстрували високу стабільність до УФ-старіння. Для чорної труби (зовнішнє застосування) за стандартом ASTM G154 вважається, що вона пройшла QUV-випробування, якщо після 2000 год:

- $\Delta E \leq 3,0$;
- втрата глянцевої $\leq 30\text{--}40\%$;
- немає прогресуючого тренду деградації.

Як видно з рис. 3.5, зразок із вмістом наповнювача 1 мас.% характеризується коливаннями ΔE в межах від 0,61 до 2,84. Найбільша зміна

кольору ($\Delta E = 2,84$) спостерігається при 1750 год експозиції, після чого відбувається зниження до 1,97. Це може бути пов'язано з ефектом «очищення» поверхні під час фази конденсації вологи. Зростання світлоти L з 26,53 до 28,46 свідчить про незначне висвітлення зразка, що може бути пов'язано з мікродеструкцією поверхневого шару зразка. При цьому значення a^* і b^* залишаються стабільними, що вказує на відсутність пожовтіння або почервоніння зразка, який зберігає чорний відтінок протягом експерименту.

	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
L	26,53	25,75	27,11	27,13	28,55	27,28	28,57	29,27	28,46
a	-0,07	-0,15	-0,13	-0,15	-0,18	-0,14	-0,31	-0,24	-0,20
b	-0,69	-0,92	-0,86	-0,78	-1,05	-0,80	-1,60	-1,42	-1,06
ΔE	0,00	0,82	0,61	0,61	2,05	0,76	2,25	2,84	1,97
Gloss	12,00	7,00	11,00	8,00	9,00	7,00	6,00	8,00	8,0

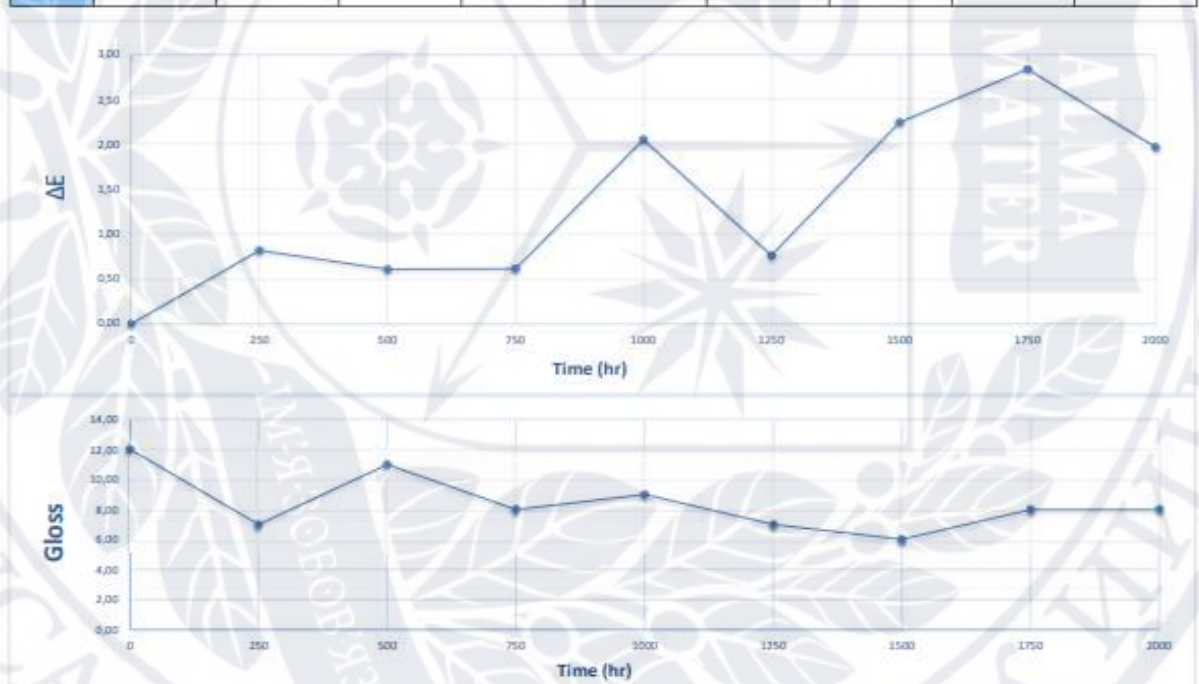


Рисунок 3.5. Динаміка зміни ΔE і глянцевої поверхні в процесі прискореного старіння QUV зразка 1-1

Варто відзначити, що після 500 год випробувань показник глянцевої стабілізувався навколо позначки 8,0. Відсутність постійного падіння глянцевої до нуля свідчить про те, що нанонаповнювач ефективно стримує руйнування

поверхні в умовах експерименту. Втрату глянцею становить менше 30 %, що відповідає вимогам довготривалого застосування виробів на відкритому повітрі.

Зразок із концентрацією наповнювача 2 мас.% демонструє ще вищу стабільність до УФ-старіння, ніж попередній, що вказує на ефективну систему УФ-стабілізації і робить його кращим для тривалої зовнішньої експлуатації (рис. 3.6).

	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
L	26,78	26,42	27,26	26,77	28,58	27,18	26,37	29,75	26,81
a	-0,01	-0,03	-0,19	-0,18	-0,33	-0,21	-0,16	-0,40	-0,21
b	-0,54	-0,66	-0,88	-0,78	-1,04	-0,81	-0,81	-1,36	-0,92
ΔE	0,00	0,38	0,62	0,29	1,90	0,52	0,51	3,11	0,43
Gloss	8,00	8,00	9,00	9,00	7,00	8,00	7,00	7,00	7,0

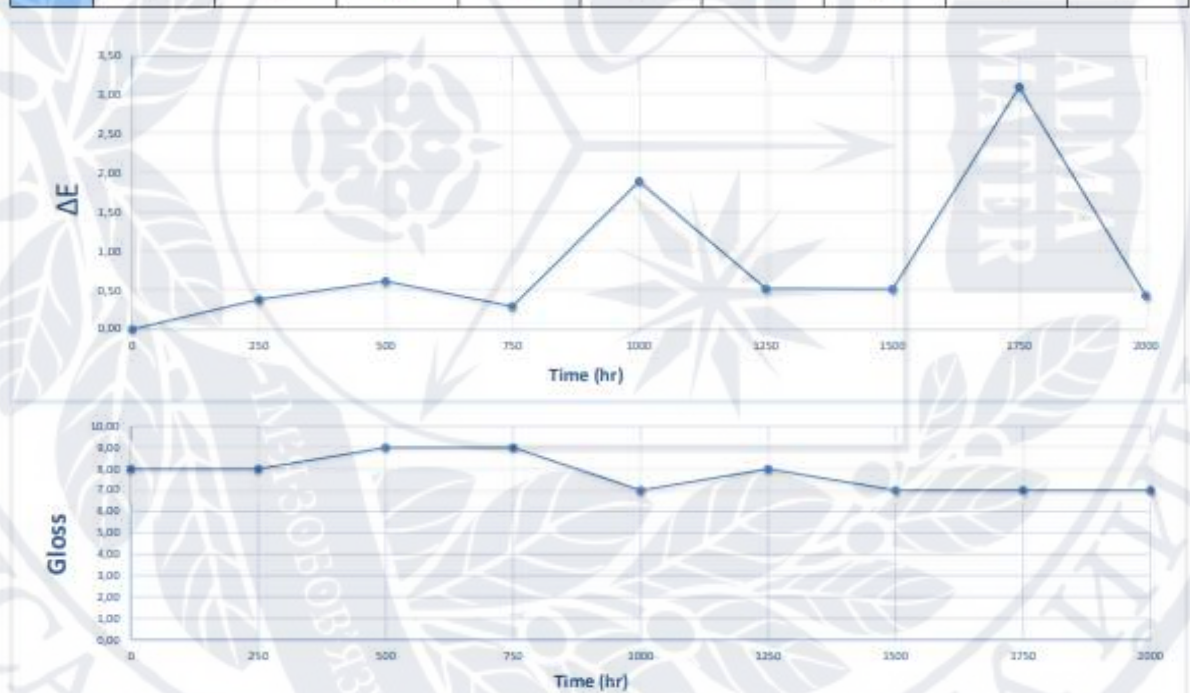


Рисунок 3.6. Динаміка зміни ΔE і глянцею поверхні в процесі прискореного старіння QUV зразка 2-1

Аналіз результатів досліджень вказує на те, протягом майже всього циклу експерименту значення ΔE утримується на рівні нижче 1,0. Стрибок на 1750 год є одиничним відхиленням і може бути пояснений тимчасовим

забруднення або утворенням нальоту продуктів деградації, які згодом були змиті з поверхні. Значення світлоти та глянцю поверхні характеризується високою стабільністю. Зразок з 2 мас.% наповнювача повністю зберіг глибину чорного кольору, поверхня зразка практично не зазнала руйнування.

Таким чином, збільшення концентрації технічного вуглецю розміром 29 нм до 2 мас.% дозволило досягти максимальної фотостабільності ПВХ-композиту. Отримані результати свідчать про те, що на поверхні матеріалу під дією УФ-випромінювання не відбуваються деструкційні процеси протягом часу експозиції. Отриманий матеріал може бути рекомендований до використання в умовах тривалої зовнішньої експлуатації.

За результатами проведених досліджень здійснено впровадження розробленого зразка композиту з розміром частинок вуглецевої сажі 29 нм і вмістом наповнювача 2 мас.% у виробничий процес ТОВ «БАЗИС 2011» (м. Вінниця). Цей композит використовується для виготовлення профілю гофрованої труби кабелепроводів, що підтверджується актом впровадження результатів магістерської роботи (додаток А), та відповідає вимогам ТУ У 22.2-38054969-002:21 [33] згідно із сертифікатом відповідності № UA.15.003.07078-25 (додаток Б).

ВИСНОВКИ

Полімерні композиційні матеріали на основі полівінілхлориду характеризуються низкою переваг, завдяки яким знаходять застосування у різних галузях. Аналіз літературних джерел показав, що перспективними наповнювачами для ПВХ є вуглецеві наночастинки, зокрема, технічний вуглець (вуглецева сажа). Введення цього компонента дозволяє отримувати матеріали з підвищеною жорсткістю, ударною в'язкістю та стійкістю до зовнішніх впливів, зокрема до ультрафіолетового опромінення. У даній роботі вивчено вплив вмісту та розміру частинок нанодисперсної вуглецевої сажі на ударну в'язкість та УФ-стійкість ПВХ-композитів.

1. Одержано композити на основі пластифікованого ПВХ з вмістом наповнювача 1 і 2 мас.% і розміром частинок вуглецевої сажі 29 нм і 34 нм.

2. Встановлено, що для системи з розміром частинок 34 нм збільшення вмісту з 1 до 2 мас.% призводить до зниження середньої висоти руйнування та енергії руйнування на 9 %. Для системи з більш високодисперсним наповнювачем (29 нм) спостерігається аналогічна тенденція. Водночас, композит із вмістом 1 мас.% вуглецевої сажі має найбільше значення енергії руйнування серед досліджених зразків (3,28 Дж), що на 41 % вище, ніж для аналогічного зразка із розміром наночастинок 34 нм.

3. Показано, що після 4 год опромінення УФ-світлом усі зразки характеризувалися зниженням ударної в'язкості, при цьому відносне зменшення енергії руйнування було меншим для композитів із вмістом наповнювача 2 мас.%, незалежно від його дисперсності. Встановлено, що оптимальний склад композиту, який одночасно характеризується високою ударною в'язкістю та УФ-стійкістю, відповідає системі з концентрацією наповнювача 2 мас.%, розмір якого становить 29 нм.

4. В ході прискорених кліматичних випробувань QUV за методикою ASTM G154 встановлено, що максимальну фотостабільність має ПВХ-композит з дисперсністю наповнювача 29 нм, вміст якого становить 2 мас.%.

На поверхні зразка під дією УФ-випромінювання не відбуваються деструкційні процеси протягом 2000 год експозиції. Отриманий матеріал може бути рекомендований до використання в умовах тривалої зовнішньої експлуатації.

5. Виявлені закономірності можуть бути використані для розробки УФ-стійких полімерних композиційних матеріалів на основі полівінілхлориду з покращеними фізико-механічними властивостями.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ

1. Wang T., Gao X., Zhu M., Wu J., Bao N. Strong and tough graphene/PVC composites with well dispersed graphene via dropwise coagulation and melt blending methods. *Composites Communications*. 2024. Vol. 51, 102083. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2024.102083>.
2. Feldman D. Poly(vinyl chloride) Nanocomposites. *Journal of Macromolecular Science, Part A*. 2014. Vol. 51, No. 8. P. 659–667. <https://doi.org/10.1080/10601325.2014.925265>.
3. Kropidłowska P., Irzmańska E., Halicka K., Płocińska M., Raszkowska-Kaczor A., Kaczor D., Szroeder P. Evaluation of polyvinyl chloride composite containing carbon fillers for potential use in protective footwear resistant to high temperature and fuel oil. *Int J Occup Saf Ergon*. 2026. Vol. 32, No. 1. P. 338–347. doi: 10.1080/10803548.2026.2614876.
4. Wang Yu, Ping X.-F., Liu L., Ping H.-L., Liu F.-Y., He H.-W., Wang P., Yu W.-W. Rheological and electrical percolation of reinforced soft polyvinyl chloride composites with different morphological carbon fillers. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. Vol. 30. P. 3510–3521. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.039>.
5. Latif M. Z. Thermal and mechanical properties of nano-carbon-reinforced polymeric nanocomposites: a review. *Journal of Composites Science*. 2023. Vol. 7, No. 10. Article 441. <https://doi.org/10.3390/jcs7100441>.
6. Jabeen S., Kausar A., Muhammad B., Gul S., Farooq M. A Review on Polymeric Nanocomposites of Nanodiamond, Carbon Nanotube, and Nanobifiller: Structure, Preparation and Properties. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2015. Vol. 54, No 13. P. 1379–1409. DOI: 10.1080/03602559.2015.1021489.
7. Ehsani M. M. Structure–function relationships of nanocarbon/polymer composites for chemiresistive sensing: a review. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 9. 3291. <https://doi.org/10.3390/s21093291>.

8. Ferreira C. Hydrocarbons: Chemical Properties of Carbon Black Stable Dispersions. *Journal of Medicinal and Organic Chemistry*. 2022. Vol. 5, No. 7. P. 106–112. DOI: 10.37532/jmoc.2022.5(6).106-112.

9. Khodabakhshi S., Fulvio P. F., Andreoli E. Carbon black reborn: Structure and chemistry for renewable energy harnessing. *Carbon*. 2020. Vol. 162. P. 604–649. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.02.058>.

10. Spahr M. E., Rother R. Carbon Black as a Polymer Filler. In: Palsule S. (eds.) *Polymers and Polymeric Composites: A Reference Series*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37179-0_36-2.

11. Leow V. J., Teh P. L., Yeoh C. K., Abdul Rahim N. A., Wong W. C., Voon C. H., Mohamed Rasidi M. S., Lim B. Y. The effect of coated calcium carbonate using stearic acid on the recovered carbon black masterbatch in low-density polyethylene composites. *e-Polymers*. 2023. Vol. No. 1. P. 20230025. <https://doi.org/10.1515/epoly-2023-0025>.

12. Wang L., Xiao W., Zhang Z., Xu B., Liang J., Cao X., Zhao S., Cui J., Gao A., Zhang G., Yan Y. Facile preparation of high-performance and multifunctional PVC-based nanocomposites with segregated structure achieved by volume repulsion and toughening effects of ABS. *European Polymer Journal*. 2021. Vol. 161. 110867. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110867>.

13. Edo G. I., Ndudi W., Ali A. B. M. *et al.* Poly(vinyl chloride) (PVC): an updated review of its properties, polymerization, modification, recycling, and applications. *Journal of Materials Science*. 2024. Vol. 59, P. 21605–21648. <https://doi.org/10.1007/s10853-024-10471-4>

14. Lee Y.-M., Lim Y., Kang S., Kim S. Migration of phthalate and non-phthalate plasticizers from polyvinyl chloride (PVC) materials. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 1002. 180559. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180559>.

15 Ali S. F. A., El Batouti M., Abdelhamed M., El-Rafey E. Formulation and characterization of new ternary stable composites: Polyvinyl chloride–wood flour–calcium carbonate of promising physicochemical properties. *Journal of Materials*

Research and Technology. 2020. Vol. 9, No. 6. P. 12840–12854. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.113>.

16. El-Hiti G. A., Ahmed D. S., Yousif E., Al-Khazrajy O. S. A., Abdallh M., Alanazi S. A. Modifications of polymers through the addition of ultraviolet absorbers to reduce the aging effect of accelerated and natural irradiation. *Polymers*. 2022. Vol. 4, No. 1. 20. <https://doi.org/10.3390/polym14010020>.

17. Gilbert M., Patrick S. Chapter 13 - Poly(Vinyl Chloride). Editor(s): M. Gilbert. *Brydson's Plastics Materials (Eighth Edition)*, Butterworth-Heinemann, 2017. P. 329–388. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00013-X>.

18. Skórczewska K., Lewandowski K., Wilczewski S. Novel composites of poly(vinyl chloride) with carbon fibre/carbon nanotube hybrid filler. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 16. 5625. <https://doi.org/10.3390/ma15165625>.

19. Tran L. C., Su X., Nguyen H., La L. B. T., Adu P., Jia Q., Lee I., Kuan H.-C., Liu X., Ma J. Advancing polymer nanocomposites through mechanochemical approaches. *Advanced Nanocomposites*. 2025. Vol. 2. P. 86–107. <https://doi.org/10.1016/j.adna.2025.03.002>.

20. Fenta E., Mebratie B. Advancements in carbon nanotube–polymer composites: enhancing properties and applications through advanced manufacturing techniques. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, No. 6. e36490. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36490>.

21. Antonio Jr. R. Synthesis, compounding, processing, morphology, structure, and properties of PVC // Poly(vinyl chloride)-based Blends, Interpenetrating Polymer Networks (IPNs), and Gels / ed. by S. Thomas, H. Akhina. Elsevier, 2024. P. 17–46. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99474-3.00017-3>.

22. Qin Q., Qin Sh., Hu Y., Lei T., Wu X., Yang J., Cui Zh., Yang Y., An M. Enhanced performance of PVC-based electromagnetic shielding composite films via solvent swelling-induced and microstructure optimization. *Polymer*. 2025. Vol. 339. 129179. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2025.129179>.

23. Li Y., Zhang Z., Zhu H., Sun J., Guo M., Zeng X., Li Y., Hashimoto M. Plasticized PVC/CNT flexible electrodes for highly responsive, stable, and durable

soft actuators and wearable sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2026. Vol. 447, No. 1. 138894. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2025.138894>.

24. Guo X., Sun P., Xiao Y. Intrinsically temperature-insensitive flexible pressure sensor based on polyvinyl chloride/carbon black composites. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. 2025. Vol. 10, No. 4. 101033. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2025.101033>.

25. Stasac C.-O., Tomșe A.-D., Costea T. O., Bandici L., Arion M.-N., Hathazi F.-I. Accelerated Aging Process of Carbon Black-Reinforced PVC (CB-PVC) Insulation by UVB-Induced Chemical Degradation. *Processes*. 2025. Vol. 13. 1844. <https://doi.org/10.3390/pr13061844>.

26. MTI Mischtechnik International GmbH. Heating-/Cooling Mixer Combination Type MK Flex-line. URL: <https://www.mti-mixer.de/en/products/mixers/heatingcooling-mixer-combination-type-mk-flex-line/> (дата звернення: 15.04.2026).

27. Counter-rotating twin-screw extruders. URL: <https://theysohn.com/en/counter-rotating-twin-screw-extruders.html> (дата звернення: 15.04.2026).

28. F32EVO: Updated version of well-known model F32 for PP, PVC and. URL: <https://itib-machinery.com/products/corrugators/f32evo/> (дата звернення: 15.04.2026).

29. ДСТУ EN 61386-1:2017 Системи кабелепроводів. Частина 1. Загальні вимоги (EN 61386-1:2008, IDT). URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_en_61386-1_2017.pdf (дата звернення: 15.04.2026).

30. ASTM G154-16. Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials. URL: <https://www.astm.org/g0154-16.html> (дата звернення: 15.04.2026).

31. НПАОП 25.0-1.01-12. Правила охорони праці на об'єктах з переробки пластичних мас. – Київ: Держгірпромнагляд України, 2012. – 30 с.

32. Правила пожежної безпеки в Україні: затв. наказом МВС України від 30.12.2014 № 1417. – Київ: МВС України, 2014.

33. ТУ У 22.2-38054969-002:21. Труби пластмасові гнучкі гофровані для застосування в електротехніці. Вінниця, 2021. 20 с.





ДОДАТОК А

Акт про впровадження результатів кваліфікаційної (магістерської) роботи «Вплив вмісту та розміру частинок вуглецевої сажі на механічні властивості та УФ-стійкість нанокомпозитів на основі полівінілхлориду»

ТОВ «БАЗИС 2011»

UA26300335000000026002525462 в АТ «Райффайзен Банк» м. Вінниця,
МФО 300335, ЄДРПОУ 38054969
Юридична адреса: 21000, м.Вінниця, вул. Сергія Зубинського, буд.46, кімнат 27, к.2
тел.: (0432) 50-81-57; факс: (0432) 50-81-56
pvc@basis2011.com.ua

АКТ

про впровадження результатів кваліфікаційної (магістерської) роботи
«Вплив вмісту та розміру частинок вуглецевої сажі на механічні
властивості та УФ-стійкість нанокompозитів на основі полівінілхлориду»

Результати магістерської роботи Волченкова Ігоря В'ячеславовича, здобувача вищої освіти спеціальності 102 «Хімія» Донецького національного університету імені Василя Стуса, «Вплив вмісту та розміру частинок вуглецевої сажі на механічні властивості та УФ-стійкість нанокompозитів на основі полівінілхлориду» мають наукове і практичне значення.

Розроблений у роботі композиційний матеріал на основі полівінілхлориду з вмістом 2 мас.% вуглецевої сажі та розміром частинок 29 нм було використано у виробничому процесі підприємства для виготовлення профілю гофрованої труби кабелепроводів. Це дозволило підвищити якість продукції, що виробляється на підприємстві.

ТОВ «БАЗИС 2011» засвідчує, що одержаний зразок характеризується підвищеною УФ-стійкістю та фотостабільністю і може бути використано для підвищення стійкості виробів зовнішньої експлуатації на основі ПВХ-композитів до дії ультрафіолетового випромінювання та атмосферних чинників для та підвищенню їх довговічності.

Директор ТОВ «БАЗИС 2011»



А.В.Калініченко



ДОДАТОК Б

Сертифікат відповідності № UA.15.003.07078-25


 ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «ВСЕУКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ ЦЕНТР
 СТАНДАРТИЗАЦІЇ, МЕТРОЛОГІЇ, СЕРТИФІКАЦІЇ ТА ЗАХИСТУ ПРАВ СПОЖИВАЧІВ»
ДОБРОВІЛЬНА СИСТЕМА УкрСЕПРО
СЕРТИФІКАТ ВІДПОВІДНОСТІ
CERTIFICATE OF CONFORMITY

Зареєстровано в Реєстрі Системи УкрСЕПРО за №UA.15.003.07078-25
Registered in the System registry for

Термін дії з 24 лютого 2025р. до 19 лютого 2029р.
Date from

Продукція <i>Products</i>	Труби пластмасові гнучкі гофровані для застосування в електротехніці. код ДКНП 22.21.29
Відповідає вимогам <i>Comply with the requirements</i>	ТУ У 22.2-38054969-002:2021 «Труби пластмасові гнучкі гофровані для застосування в електротехніці. Технічні умови»
Заявник <i>Name and address of the applicant</i>	ТОВ «БАЗИС 2011», юридична адреса: вул. Сергія Зулінського, буд. 46, корп. 27, к. 2 м. Вінниця, 21000, код ЄДРПОУ 38054969
Виробник <i>Name and address of the manufacturer</i>	ТОВ «БАЗИС 2011», адреса виробництва: вул. Сергія Зулінського, буд. 46, корп. 27, к. 2 м. Вінниця, 21000, код ЄДРПОУ 38054969
Додаткова інформація <i>Additional information</i>	Труби пластмасові гнучкі гофровані для застосування в електротехніці, що виготовляються серійно з 24.02.2024 до 19.02.2029. Інспектування з періодичністю один раз на рік. Схема сертифікації- 5 (5).
Сертифікат видано органом з сертифікації <i>Certificate is issued by the certification body</i>	згідно статті 24 закону України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ», адреса: вул. Метрологічна, 4, м. Київ, 03143, тел. 526-12-65
На підставі <i>On the grounds of</i>	Протоколу випробування №0205010/25 від 05.02.2025 р. (ВЛ ТОВ «ВСП «НІВДЕНТЕСТ», Атестат акредитації НААУ №20485 від 16.04.2024); протоколу випробувань №335/1-2024 від 24.12.2024, №336/1-2024 від 24.12.2024 (Науково-дослідний Центр «Пожежна безпека», Атестат акредитації №20278 від 16.04.2022) сертифікату відповідності системи контролю виробництва №UA.15.00306484-24 від 20.02.24р. ОС «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ» Протоколу аналізу №29/25 від 21.02.2025р.
Заступник керівника органу з сертифікації <i>Deputy director of Conformity Assessment Body</i> Керівник або уповноважена особа ОС / Head or Authorized person	 підпис, підписок / signature Віктор РИМЕР підпис, підписок / initials, surname
М.П. / L.S. 	Частину сертифіката можна перевірити в реєстрі Системи УкрСЕПРО на сайті www.ukrsepro.ua / Validity of the certificate can be checked in the register of the UkrSEPRO System at website www.ukrsepro.ua