

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2026.4.4>

Received: 21.07.2026

Revised: 24.08.2026

Accepted: 30.09.2026

Published: 05.10.2026

УДК 678.5/.8:620.193

Сергій ТИТАРЕНКО, Владислав СТРАШНИЙ

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ АТМОСФЕРОСТІЙКОСТІ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ ДЕКОРАТИВНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Мета. Визначення найбільш ефективних підходів до підвищення атмосферостійкості, збереження експлуатаційних властивостей і довговічності композитних матеріалів декоративного призначення.

Методика. Дослідження базується на комплексному аналізі науково-технічної літератури щодо атмосферного старіння полімерних композитів унаслідок їх фотоокиснювальної, термоокиснювальної, гідролітичної та біологічної деградації, а також сучасних способів стабілізації та захисту. Використано методи порівняльного аналізу для оцінювання ефективності світлостабілізаторів, антиоксидантів, полімерних покриттів і нанорозмірних модифікаторів.

Результати. Проаналізовано основні фактори деградації полімерних композитів під впливом різних чинників зовнішнього середовища. Встановлено, що найбільшого поширення для підвищення довговічності полімерних композитів набули світлостабілізатори, антиоксиданти, захисні полімерні покриття та нанорозмірні модифікатори. Визначено, що найкращі результати забезпечують комплексні системи захисту, що дозволяють одночасно протидіяти фотоокиснювальній, термоокиснювальній та вологоіндукованій деградації композитів.

Наукова новизна. Узагальнено та систематизовано сучасні підходи до захисту полімерних композитів від дії зовнішніх факторів з урахуванням механізмів деградації матеріалів. Показано взаємозв'язок між характером деструктивних процесів і ефективністю різних методів стабілізації. Обґрунтовано доцільність застосування комплексних багатокомпонентних систем захисту для підвищення атмосферостійкості полімерних композитів декоративного призначення.

Практична значимість. Отримані результати можуть бути використані під час розроблення атмосферостійких полімерних композитів декоративного призначення, призначених для експлуатації у зовнішньому середовищі.

Ключові слова: полімерні композити; атмосферне старіння; фотодеструкція; термоокиснювальна деградація; світлостабілізатори; антиоксиданти; полімерні покриття; наномодифікатори; атмосферостійкість; довговічність.

Вступ. Полімерні композиційні матеріали належать до найбільш перспективних класів сучасних конструкційних і функціональних матеріалів, що поєднують високу питому міцність, корозійну стійкість, невелику густину та широкі можливості керування експлуатаційними властивостями. Завдяки комплексу зазначених характеристик полімерні композити широко застосовуються у будівництві, транспорті, енергетиці, архітектурі, виробництві фасадних систем, оздоблювальних панелей, малих архітектурних форм та інших виробів декоративного й конструкційного призначення [1, 2].

Особливе місце серед них займають полімерні композити декоративного призначення, які поряд із забезпеченням необхідних фізико-механічних характеристик повинні тривалий час зберігати зовнішній вигляд, колір, блиск, цілісність поверхні та стабільність геометричних розмірів. На відміну від матеріалів, що експлуатуються всередині приміщень, декоративні композити піддаються безперервному впливу комплексу атмосферних факторів, серед яких найбільше значення мають ультрафіолетове випромінювання, кисень повітря, атмосферна волога, температурні коливання, механічне зношування та біологічні чинники [1, 3, 4].

Дослідження процесів атмосферного старіння полімерних матеріалів свідчать, що деградація композитів має комплексний характер і є результатом синергетичної дії зовнішніх факторів. Під дією сонячного випромінювання та кисню відбувається фотоокиснювальна деструкція полімерної матриці, яка супроводжується утворенням вільних радикалів, розривом

макромолекулярних ланцюгів, зміною молекулярної маси, появою поверхневих тріщин та погіршенням механічних властивостей матеріалу [1, 5, 6]. Для багатьох полімерних систем додатковим фактором старіння є термоокиснювальна деградація, яка прискорюється під впливом підвищених температур та призводить до зниження довговічності виробів [6, 7].

Особливої актуальності проблема деградації набуває для композитів, що використовуються у зовнішньому середовищі. За результатами досліджень атмосферного старіння встановлено, що тривалий вплив ультрафіолетового випромінювання та вологи спричиняє суттєве зниження показників міцності й жорсткості композитних матеріалів, а також погіршення їх декоративних властивостей [1, 8]. Для композитів, які містять природні волокнисті або лігноцелюлозні наповнювачі, додатково виникають процеси водопоглинання, порушення міжфазної адгезії та біологічного ураження, що ще більше прискорює деструктивні процеси [1, 2].

Підвищення довговічності полімерних композитів нерозривно пов'язане із застосуванням сучасних методів стабілізації та захисту матеріалів. Найбільш поширеними підходами є використання антиоксидантів, ультрафіолетових абсорберів, світлостабілізаторів типу HALS (Hindered Amine Light Stabilizers), нанорозмірних модифікаторів, а також захисних полімерних покриттів [5, 6, 9, 10]. В останні роки значну увагу дослідників привертають нанокомпозиційні системи на основі оксидів титану та цинку, а також багатофункціональні полімерні покриття, здатні одночасно забезпечувати захист від ультрафіолетового випромінювання, вологи та термоокиснювального старіння [11–16].

Незважаючи на значну кількість наукових досліджень, присвячених деградації полімерних матеріалів, універсального способу захисту полімерних композитів досі не існує. Ефективність кожного методу залежить від хімічної природи полімерної матриці, типу наповнювача, умов експлуатації та вимог до кінцевого виробу [3, 17]. Тому важливо провести системний аналіз основних факторів деградації полімерних композитів та сучасних технологічних рішень щодо їх захисту від зовнішніх впливів.

У роботі застосовано узагальнення та порівняльний аналіз наукових публікацій щодо механізмів атмосферного старіння і сучасних способів стабілізації полімерних композитів.

Постановка завдання. Метою роботи є визначення найбільш ефективних підходів до підвищення атмосферостійкості, збереження експлуатаційних властивостей і довговічності композитних матеріалів декоративного призначення.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких завдань:

- проаналізувати основні фактори зовнішнього середовища, що викликають деградацію полімерних композитів;
- дослідити механізми фотоокиснювального, термоокиснювального, гідролітичного та біологічного старіння полімерних композиційних матеріалів;
- провести порівняльний аналіз сучасних методів захисту полімерних композитів, включаючи застосування світлостабілізаторів, антиоксидантів, нанорозмірних модифікаторів та захисних покриттів;
- оцінити ефективність різних підходів до підвищення стійкості композитів до атмосферних впливів;
- визначити найбільш перспективні напрями розвитку технологій захисту полімерних композитів декоративного призначення.

Результати дослідження. Полімерні композити, що експлуатуються у зовнішньому середовищі, піддаються комплексній дії атмосферних факторів, серед яких найбільше значення мають ультрафіолетове випромінювання, температура, волога та біологічні агенти (рис. 1). У реальних умовах їх дія має синергетичний характер, на відміну від ізольованого впливу окремих чинників, що спричиняє прискорене старіння матеріалів та поступову втрату експлуатаційних властивостей [1–3, 8, 18, 19].

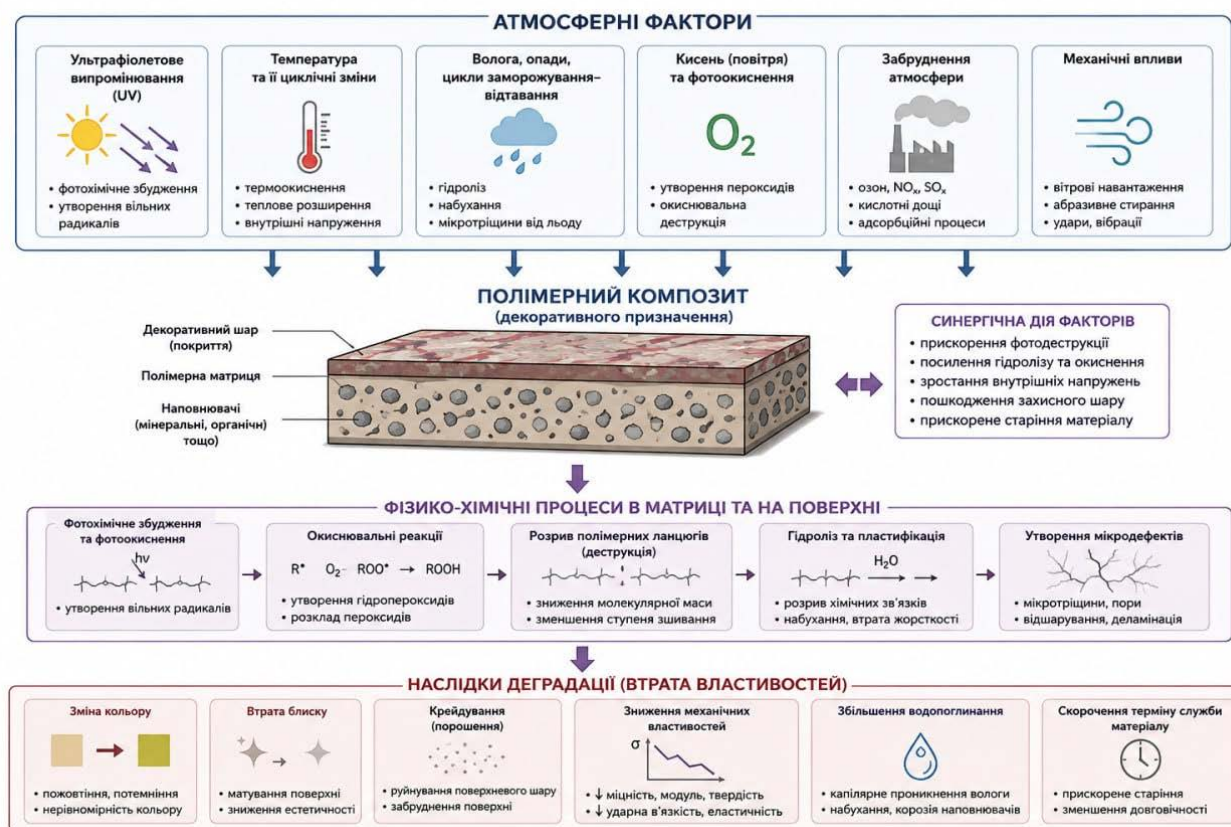


Рис. 1. Атмосферні фактори впливу на полімерні композити

Ультрафіолетове випромінювання є основним фактором фотоокиснювальної деградації полімерної матриці. Поглинання енергії УФ-випромінювання призводить до утворення вільних радикалів, розриву макромолекулярних ланцюгів та формування кисневмісних продуктів окиснення, що супроводжується зміною кольору, зниженням міцності та утворенням поверхневих дефектів [1, 3, 5, 6, 9].

Дія підвищених температур стимулює термоокиснювальні процеси та пришвидшує перебіг хімічних реакцій у полімерній матриці. Особливо чутливими до такого впливу є поліолефіни, для яких характерне поступове зниження молекулярної маси та погіршення механічних характеристик під час тривалої експлуатації [6, 7].

Атмосферна волога додатково посилює деградаційні процеси шляхом проникнення у структуру композиту, зниження міжфазної адгезії та формування мікродефектів. Особливо інтенсивно ці явища проявляються у композитах з природними наповнювачами, що характеризуються підвищеною гігроскопічністю [1, 8, 20–25].

Для деревно-полімерних та інших природнонаповнених композитів додаткове значення мають біологічні чинники, зокрема діяльність грибків та мікроорганізмів, розвиток яких значною мірою залежить від наявності вологи. У результаті відбувається прискорене погіршення фізико-механічних та декоративних характеристик матеріалу [1, 4].

Таким чином, довговічність полімерних композитів визначається сукупною дією кількох механізмів деградації, що зумовлює необхідність використання комплексних підходів до їх стабілізації та захисту.

Використання світлостабілізаторів для захисту композитів від фотоокиснювальної деградації. Одним із найпоширеніших способів підвищення атмосферостійкості полімерних композитів є використання світлостабілізуючих добавок. Їх застосування спрямоване на зменшення негативного впливу ультрафіолетового випромінювання, яке є основним фактором атмосферного старіння полімерних матеріалів [1, 3, 5].

Серед світлостабілізаторів найбільшого поширення набули ультрафіолетові абсорбери та стабілізатори типу HALS (Hindered Amine Light Stabilizers). Ультрафіолетові абсорбери поглинають високоенергетичне випромінювання та перетворюють його на теплову енергію, знижуючи ймовірність руйнування полімерних ланцюгів. Експериментальні дослідження поліпропіленових композицій підтверджують ефективність HALS і нанорозмірного ZnO як компонентів систем УФ-захисту. Поєднання радикал-поглинальної дії HALS з екрануванням ультрафіолетового випромінювання частинками ZnO дає змогу підвищити стійкість полімеру до тривалого опромінення [26].

На відміну від УФ-абсорберів, HALS не екранують випромінювання безпосередньо, а пригнічують радикальні процеси, що виникають під час фотодеструкції полімеру. Завдяки здатності багаторазово брати участь у реакціях нейтралізації радикалів вони забезпечують довготривалий стабілізуючий ефект навіть у невеликих концентраціях [9, 10].

Аналіз літературних даних показує, що найбільш ефективний захист полімерних композитів досягається при поєднанні УФ-абсорберів та HALS-стабілізаторів. За такого підходу абсорбери зменшують кількість енергії, що надходить до полімерної матриці, а HALS-стабілізатори уповільнюють розвиток фотоокиснювальних процесів. Подібні комбіновані системи сьогодні є стандартним рішенням для полімерних матеріалів зовнішнього застосування [5, 9, 10].

Особливого значення світлостабілізатори набувають для поліолефінових композитів і деревно-полімерних композиційних матеріалів, для яких ультрафіолетове випромінювання є одним із головних чинників зниження довговічності. Результати природного та прискореного атмосферного старіння поліолефінових і деревно-полімерних композитів підтверджують необхідність застосування ефективних стабілізуювальних систем для збереження їх фізико-механічних і декоративних властивостей [20–24].

Використання антиоксидантів для запобігання термоокиснювальній деградації. Важливою складовою систем захисту полімерних композитів є антиоксиданти, які забезпечують стабільність матеріалу під дією підвищених температур та кисню повітря. Основним механізмом їх дії є пригнічення радикальних реакцій окиснення, що призводять до руйнування полімерних макромолекул [6, 7, 10]. Перспективним напрямом є розроблення антиоксидантів на основі відновлюваної рослинної сировини. Випробування похідних гідроксикоричних кислот у поліпропілені показали, що відповідна модифікація біогенних сполук може забезпечувати достатню термостійкість, сумісність із поліолефіною матрицею та виражену стабілізуювальну дію під час перероблення і теплового старіння [27]. Найкращі результати забезпечують комбіновані системи стабілізації, що містять обидва типи антиоксидантів. Такий підхід дозволяє одночасно контролювати різні стадії процесу окиснення та суттєво підвищувати довговічність полімерної матриці [6, 10].

Для композитів на основі поліетилену та поліпропілену застосування антиоксидантів є практично обов'язковим елементом рецептури. Особливо це стосується виробів для зовнішнього застосування, які зазнають комплексного впливу тепла, кисню та сонячного випромінювання [6, 7].

Разом із тим використання лише антиоксидантів не забезпечує достатнього рівня атмосферостійкості. У сучасних композиційних матеріалах вони зазвичай застосовуються в поєднанні зі світлостабілізаторами, захисними покриттями та функціональними нанонаповнювачами [6, 9, 10].

Захисні полімерні покриття як засіб підвищення атмосферостійкості композитів. Одним із найбільш універсальних підходів до захисту полімерних композитів є використання спеціальних покриттів, які створюють бар'єр між матеріалом і навколишнім середовищем. На відміну від стабілізуючих добавок, що вводяться до складу композиту, покриття забезпечують захист безпосередньо на поверхні виробу та дозволяють зменшити вплив ультрафіолетового випромінювання, вологи та атмосферних забруднень [14–16, 28, 29].

Серед сучасних полімерних покриттів найбільш широко використовуються акрилові, поліуретанові та акрил-уретанові системи. Акрилові покриття характеризуються високою світлостійкістю та добрим збереженням кольору в умовах зовнішньої експлуатації. Водночас поліуретанові покриття забезпечують вищу механічну міцність, еластичність та стійкість до абразивного зношування [14, 15, 30–32].

Значний інтерес становлять воднодисперсійні поліуретанові системи, які можуть бути модифіковані функціональними добавками для регулювання захисних властивостей покриття [14, 16, 33, 34].

Перспективним напрямом розвитку є створення акрил-уретанових гібридних систем. Поєднання акрилових та поліуретанових компонентів дозволяє отримувати покриття зі збалансованими експлуатаційними характеристиками та високою атмосферостійкістю [15, 35].

Порівняльний аналіз літературних джерел свідчить, що серед сучасних покриттів саме поліуретанові та акрил-уретанові системи забезпечують найбільш ефективний комплексний захист полімерних композитів декоративного призначення від дії атмосферних факторів [15, 30, 31, 35, 36].

Нанорозмірні модифікатори у системах захисту полімерних композитів. Останніми роками важливим напрямом підвищення атмосферостійкості полімерних композитів стало використання функціональних нанорозмірних наповнювачів. Їх застосування дозволяє одночасно впливати на механічні, бар'єрні та експлуатаційні характеристики матеріалу [11–13].

Серед неорганічних наномодифікаторів значний інтерес становлять TiO_2 та ZnO , здатні поглинати або розсіювати ультрафіолетове випромінювання. Ефективність нанорозмірного ZnO як компонента системи УФ-захисту поліпропілену підтверджено експериментально [26]. Водночас фотокаталітична активність TiO_2 за певних умов може прискорювати окиснювальну деградацію полімерної матриці, тому важливими є контроль його кристалічної форми, дисперсності та стану поверхні [11–13].

Водночас перспективними є наночастинки діоксиду кремнію та шаруваті силікати. Їх введення у полімерну матрицю дозволяє зменшити проникнення вологи та кисню, що позитивно впливає на довговічність матеріалу та знижує швидкість перебігу деградаційних процесів [37–39].

Дослідження останніх років підтверджують перспективність гібридних стабілізуючих систем і необхідність комплексного оцінювання змін кольору, поверхні та властивостей композитів після УФ-старіння [39, 40].

Таким чином, використання нанорозмірних модифікаторів є одним із найбільш перспективних напрямів створення атмосферостійких полімерних композитів нового покоління.

Порівняльна оцінка ефективності сучасних способів захисту полімерних композитів. Проведений аналіз літературних джерел свідчить, що жоден із сучасних способів захисту полімерних композитів не забезпечує універсальної протидії всім механізмам деградації. Ефективність конкретного підходу визначається природою полімерної матриці, типом наповнювача, умовами експлуатації виробу та тривалістю його використання. Саме тому сучасна тенденція розвитку атмосферостійких полімерних композитів полягає не у використанні окремих стабілізуючих компонентів, а у створенні багатокомпонентних систем захисту, здатних забезпечувати комплексний вплив на різні механізми старіння матеріалу [5, 6, 9, 10].

З метою узагальнення результатів аналізу було виконано порівняльну оцінку найбільш поширених способів захисту полімерних композитів (табл. 1).

Таблиця 1

**Порівняльна оцінка сучасних способів захисту полімерних композитів
від зовнішніх впливів**

Спосіб захисту	Захист від УФ-випромінювання	Захист від термо-окиснення	Захист від вологи	Довго-вічність ефекту	Основні переваги	Основні недоліки
УФ-абсорбери	Високий	Низький	Низький	Середня	Простота застосування, висока ефективність на початковому етапі	Можлива міграція та виснаження
HALS-стабілізатори	Дуже високий	Середній	Низький	Висока	Тривала дія, висока ефективність за низьких дозувань	Обмежений вплив на інші фактори старіння
Антиоксиданти	Низький	Високий	Низький	Висока	Захист під час переробки та експлуатації	Не захищають від УФ-випромінювання
Акрилові покриття	Середній	Середній	Високий	Середня	Світлостійкість, економічність	Обмежена зносостійкість
Поліуретанові покриття	Високий	Високий	Високий	Висока	Комплексний захист, еластичність	Вища вартість
TiO ₂ , ZnO	Високий	Середній	Середній	Висока	УФ-екранування, додаткові функціональні властивості	Ризик агрегації частинок
SiO ₂ , наноглини	Низький	Середній	Високий	Висока	Бар'єрний ефект, зміцнення структури	Потребують якісного диспергування
Комплексні системи	Дуже високий	Дуже високий	Високий	Дуже висока	Найбільш ефективний комплексний захист	Найскладніша рецептура

Світлостабілізатори та ультрафіолетові абсорбери найбільш ефективні для сповільнення фотоокиснювальної деградації полімерів. Їх застосування дозволяє значно зменшити швидкість утворення вільних радикалів та зберегти фізико-механічні характеристики матеріалів під дією сонячного випромінювання. Разом із тим такі добавки практично не впливають на процеси водопоглинання або термоокиснювального старіння, тому потребують комбінування з іншими засобами стабілізації [5, 6, 9].

Антиоксиданти забезпечують ефективний захист полімерної матриці від термоокиснювальної деградації та широко використовуються як під час переробки полімерів, так і на стадії експлуатації готових виробів. Найкращі результати демонструють комбіновані системи первинних і вторинних антиоксидантів, що забезпечують захист матеріалу на різних стадіях окиснювальних процесів [6, 7, 10].

Полімерні покриття формують фізичний бар'єр між композитом та навколишнім середовищем, забезпечуючи додатковий захист від ультрафіолетового випромінювання, вологи й механічного зношування. Особливо перспективними для декоративних полімерних композитів вважаються поліуретанові та акрил-уретанові покриття, які поєднують високу атмосферостійкість, добру адгезію та тривалий термін служби [14–16, 29].

Нанорозмірні модифікатори дозволяють покращувати не лише захисні, але й механічні характеристики композитних матеріалів. Наночастинки TiO₂ та ZnO забезпечують додатковий

захист від ультрафіолетового випромінювання, тоді як SiO_2 та наноглини сприяють підвищенню бар'єрних властивостей полімерної матриці та зменшенню проникнення вологи й кисню [11–13, 26, 37–39].

Аналіз наведених даних свідчить, що найбільш ефективним підходом до забезпечення довговічності полімерних композитів є поєднання декількох механізмів стабілізації. У сучасних композиційних матеріалах все частіше застосовуються рецептури, що одночасно містять світлостабілізатори, антиоксиданти, нанорозмірні модифікатори та захисні покриття. Такий підхід дозволяє забезпечити комплексний захист від найбільш поширених факторів деградації та суттєво підвищити атмосферостійкість матеріалу [6, 9, 14, 15].

Перспективні напрями розвитку систем захисту полімерних композитів. Аналіз сучасних досліджень свідчить, що подальший розвиток технологій захисту полімерних композитів буде пов'язаний з переходом від окремих стабілізуючих добавок до багатокомпонентних систем комплексної дії. Найбільший інтерес викликають композиції, які одночасно містять світлостабілізатори, антиоксиданти, нанорозмірні модифікатори та функціональні покриття [6, 9, 10].

Перспективним напрямом також є розроблення інтелектуальних захисних систем, здатних адаптуватися до умов експлуатації, а також використання цифрових методів прогнозування довговічності композитів. Математичне моделювання процесів старіння дозволяє прогнозувати термін служби матеріалів та оптимізувати їх склад ще на етапі розроблення [41].

З урахуванням сучасних тенденцій можна очікувати, що найбільш ефективними в найближчі роки стануть гібридні системи захисту, які поєднуюватимуть фізичні, хімічні та бар'єрні механізми протидії атмосферному старінню полімерних композитів. Саме такі підходи створюють основу для розроблення довговічних композиційних матеріалів декоративного призначення з прогнозованим терміном експлуатації.

Висновки. У статті проаналізовано основні механізми деградації полімерних композитів декоративного призначення під дією чинників зовнішнього середовища. Встановлено, що найбільший вплив на стан матеріалів чинять ультрафіолетове випромінювання, підвищена температура, атмосферна волога та біологічні агенти. Їх комплексна дія спричиняє фотоокиснювальну та термоокиснювальну деструкцію полімерної матриці, погіршення міжфазної адгезії між компонентами композиту та поступове зниження фізико-механічних і декоративних властивостей матеріалу.

Показано, що найбільш небезпечним чинником атмосферного старіння полімерних композитів є ультрафіолетове випромінювання, яке ініціює утворення вільних радикалів та розвиток ланцюгових фотоокиснювальних процесів. Для композитів, що містять природні наповнювачі, додатковий негативний вплив чинять процеси водопоглинання та біологічного ураження, які прискорюють деградацію матеріалу.

Встановлено, що ефективними засобами захисту полімерних композитів від фотодеструкції є ультрафіолетові абсорбери та світлостабілізатори типу HALS, тоді як для запобігання термоокиснювальному старінню доцільним є використання комбінованих систем первинних і вторинних антиоксидантів. Використання зазначених добавок дозволяє суттєво уповільнити процеси деградації полімерної матриці та подовжити термін експлуатації виробів.

Визначено перспективність застосування захисних полімерних покриттів та нанорозмірних модифікаторів як додаткових інструментів підвищення атмосферостійкості композитів. Найкращий комплекс експлуатаційних характеристик демонструють поліуретанові та акрил-уретанові покриття, а серед наномодифікаторів найбільший інтерес становлять TiO_2 , ZnO , SiO_2 та шаруваті силікати, які забезпечують УФ-захист і покращення бар'єрних властивостей матеріалу. Найбільш ефективним напрямом підвищення довговічності полімерних композитів є використання комплексних систем захисту, які поєднують

світлостабілізатори, антиоксиданти, нанорозмірні модифікатори та захисні полімерні покриття.

References

1. Nzimande, M. C., Mtibe, A., Tichapondwa, S., & John, M. J. (2024). A review of weathering studies in plastics and biocomposites: Effects on mechanical properties and emissions of volatile organic compounds (VOCs). *Polymers*, 16(8), 1103. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16081103>.
2. Harle, S. M., & Chitkeshwar, A. (2024). Durability and long-term performance of fiber reinforced polymer (FRP) composites: A review. *Structures*, 60, 105881. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.105881>.
3. Mušič, B., & Sever Škapin, A. (2023). Degradation and stabilization of polymer materials. *Polymers*, 15(23), 4519. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15234519>.
4. Zhang, X., Yin, Z., Xiang, S., et al. (2024). Degradation of polymer materials in the environment and its impact on the health of experimental animals: A review. *Polymers*, 16(19), 2807. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16192807>.
5. El-Hiti, G. A., Ahmed, D. S., Yousif, E., et al. (2022). Modifications of polymers through the addition of ultraviolet absorbers to reduce the aging effect of accelerated and natural irradiation. *Polymers*, 14(1), 20. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14010020>.
6. Gijsman, P., & Fiorio, R. (2023). Long term thermo-oxidative degradation and stabilization of polypropylene (PP) and the implications for its recyclability. *Polymer Degradation and Stability*, 208, 110260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110260>.
7. Gijsman, P., Hensen, G., & Mak, M. (2021). Thermal initiation of the oxidation of thermoplastic polymers (polyamides, polyesters and UHMwPE). *Polymer Degradation and Stability*, 183, 109452. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109452>.
8. Xu, B., van den Hurk, B., Liu, T., et al. (2024). Effect of UV-water weathering on the mechanical properties of flax-fiber-reinforced polymer composites. *Polymer Composites*. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.28057>.
9. Gijsman, P. (2017). A review on the mechanism of action and applicability of hindered amine stabilizers. *Polymer Degradation and Stability*, 145, 2–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.05.012>.

Література

1. Nzimande M. C., Mtibe A., Tichapondwa S., John M. J. A Review of Weathering Studies in Plastics and Biocomposites: Effects on Mechanical Properties and Emissions of Volatile Organic Compounds (VOCs). *Polymers*. 2024. Vol. 16, No. 8. Art. 1103. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16081103>.
2. Harle S. M., Chitkeshwar A. Durability and Long-Term Performance of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites: A Review. *Structures*. 2024. Vol. 60. Art. 105881. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.105881>.
3. Mušič B., Sever Škapin A. Degradation and Stabilization of Polymer Materials. *Polymers*. 2023. Vol. 15, No. 23. Art. 4519. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15234519>.
4. Zhang X., Yin Z., Xiang S. et al. Degradation of Polymer Materials in the Environment and Its Impact on the Health of Experimental Animals: A Review. *Polymers*. 2024. Vol. 16, No. 19. Art. 2807. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16192807>.
5. El-Hiti G. A., Ahmed D. S., Yousif E. et al. Modifications of Polymers through the Addition of Ultraviolet Absorbers to Reduce the Aging Effect of Accelerated and Natural Irradiation. *Polymers*. 2022. Vol. 14, No. 1. Art. 20. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14010020>.
6. Gijsman P., Fiorio R. Long Term Thermo-Oxidative Degradation and Stabilization of Polypropylene (PP) and the Implications for Its Recyclability. *Polymer Degradation and Stability*. 2023. Vol. 208. Art. 110260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110260>.
7. Gijsman P., Hensen G., Mak M. Thermal Initiation of the Oxidation of Thermoplastic Polymers (Polyamides, Polyesters and UHMwPE). *Polymer Degradation and Stability*. 2021. Vol. 183. Art. 109452. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109452>.
8. Xu B., van den Hurk B., Liu T. et al. Effect of UV-Water Weathering on the Mechanical Properties of Flax-Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Polymer Composites*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.28057>.
9. Gijsman P. A Review on the Mechanism of Action and Applicability of Hindered Amine Stabilizers. *Polymer Degradation and Stability*. 2017. Vol. 145. P. 2–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.05.012>.

10. Gijsman, P. (2023). Polymer stabilization. In M. Kutz (Ed.), *Applied plastics engineering handbook: Processing, sustainability, materials, and applications* (3rd ed., pp. 499–526). Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88667-3.00027-8>.
11. Younis, A. B., Haddad, Y., Košarišćanová, L., & Šmerková, K. (2023). Titanium dioxide nanoparticles: Recent progress in antimicrobial applications. *WIREs Nanomedicine and Nanobiotechnology*, 15(3), e1860. DOI: <https://doi.org/10.1002/wnan.1860>.
12. Kovinchuk, I., Haiuk, N., Lazzara, G., Cavallaro, G., & Sokolsky, G. (2023). Enhanced photocatalytic degradation of PE film by anatase/ γ -MnO₂. *Polymer Degradation and Stability*, 210, 110295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110295>.
13. Rathore, C., Yadav, V. K., et al. (2023). Microbial synthesis of titanium dioxide nanoparticles and their importance in wastewater treatment and antimicrobial activities: A review. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1270245. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1270245>.
14. Tian, S. (2020). Recent advances in functional polyurethane and its application in leather manufacture: A review. *Polymers*, 12(9), 1996. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12091996>.
15. Mehravar, S., Ballard, N., Tomovska, R., & Asua, J. M. (2019). Polyurethane/acrylic hybrid waterborne dispersions: Synthesis, properties and applications. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(46), 20902–20922. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b02324>.
16. Wang, C., Wu, J., Li, L., Mu, C., & Lin, W. (2020). A facile preparation of a novel non-leaching antimicrobial waterborne polyurethane leather coating functionalized by quaternary phosphonium salt. *Journal of Leather Science and Engineering*, 2, 2. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42825-019-0014-8>.
17. Ouchi, M., Katsumata, R., Sato, E., & Tanaka, K. (2024). Special issue: Polymer degradation for a sustainable future. *Polymer Journal*, 56(4), 221. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41428-023-00882-6>.
18. Karekar, A., Schicktan, C., Tariq, M., et al. (2023). Effects of artificial weathering in NR/SBR elastomer blends. *Polymer Degradation and Stability*, (208), 110267.
19. Real, L. E. P. (2023). Weathering of polymers and plastic materials. Cham: Springer Nature Switzerland. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-33285-2>.
10. Gijsman P. Polymer Stabilization. *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing, Sustainability, Materials, and Applications*. 3rd ed. Elsevier, 2023. P. 499–526. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88667-3.00027-8>.
11. Younis A. B., Haddad Y., Košarišćanová L., Šmerková K. Titanium Dioxide Nanoparticles: Recent Progress in Antimicrobial Applications. *WIREs Nanomedicine and Nanobiotechnology*. 2023. Vol. 15, No. 3. Art. e1860. DOI: <https://doi.org/10.1002/wnan.1860>.
12. Kovinchuk I., Haiuk N., Lazzara G., Cavallaro G., Sokolsky G. Enhanced Photocatalytic Degradation of PE Film by Anatase/ γ -MnO₂. *Polymer Degradation and Stability*. 2023. Vol. 210. Art. 110295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110295>.
13. Rathore C., Yadav V. K. et al. Microbial Synthesis of Titanium Dioxide Nanoparticles and Their Importance in Wastewater Treatment and Antimicrobial Activities: A Review. *Frontiers in Microbiology*. 2023. Vol. 14. Art. 1270245. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1270245>.
14. Tian S. Recent Advances in Functional Polyurethane and Its Application in Leather Manufacture: A Review. *Polymers*. 2020. Vol. 12, No. 9. Art. 1996. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12091996>.
15. Mehravar S., Ballard N., Tomovska R., Asua J. M. Polyurethane/Acrylic Hybrid Waterborne Dispersions: Synthesis, Properties and Applications. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2019. Vol. 58, No. 46. P. 20902–20922. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b02324>.
16. Wang C., Wu J., Li L., Mu C., Lin W. A Facile Preparation of a Novel Non-Leaching Antimicrobial Waterborne Polyurethane Leather Coating Functionalized by Quaternary Phosphonium Salt. *Journal of Leather Science and Engineering*. 2020. Vol. 2. Art. 2. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42825-019-0014-8>.
17. Ouchi M., Katsumata R., Sato E., Tanaka K. Special Issue: Polymer Degradation for a Sustainable Future. *Polymer Journal*. 2024. Vol. 56, No. 4. P. 221. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41428-023-00882-6>.
18. Karekar A., Schicktan C., Tariq M. et al. Effects of Artificial Weathering in NR/SBR Elastomer Blends. *Polymer Degradation and Stability*. 2023. Vol. 208. Art. 110267.
19. Real L. E. P. Weathering of Polymers and Plastic Materials. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. 152 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-33285-2>.

20. Wei, L., Cappellazzi, J., Manning, M., McDonald, A. G., Foster, S., & Morrell, J. J. (2022). Long-term outdoor weathering evaluation of wood plastic composites. *European Journal of Wood and Wood Products*, 80(1), 23–34. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01762-7>.
21. Widiastuti, I., Prananda, R., Putra, J. A., Ananda, D. R., & Estriyanto, Y. (2023). Optimizing the water absorption behaviour and natural weathering resistance of compatibilized ironwood-based recycled polypropylene composites. *Composites Part C: Open Access*, (12), 100423. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2023.100423>.
22. Siddiqui, M. N., Redhwi, H. H., Andrady, A. L., Furquan, S. A., & Hussain, S. (2025). Effect of extensive solar ultra-violet irradiation on the durability of high-density polyethylene- and polypropylene-based wood-plastic composites. *Polymers*, 17(1), 74. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17010074>.
23. Vasiljevs, L. O., Zabarovska, R., Gulevska, E., et al. (2024). Changes in wood plastic composite properties after natural weathering and potential microplastic formation. *Forests*, 15(12), 2102. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15122102>.
24. Wu, Y.-H., Chao, W.-C., Yang, T.-H., et al. (2023). Surface, physicomechanical, and chemical properties of wood/polypropylene composites from various formulations after accelerated weathering. *BioResources*, 18(3), 6348–6363. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.18.3.6348-6363>.
25. Yorseng, K., Rangappa, S. M., Parameswaranpillai, J., & Siengchin, S. (2020). Influence of accelerated weathering on the mechanical, fracture morphology, thermal stability, contact angle, and water absorption properties of natural fiber fabric-based epoxy hybrid composites. *Polymers*, 12(10), 2254. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12102254>.
26. Brostow, W., Lu, X., Gencel, O., & Osmanson, A. T. (2020). Effects of UV stabilizers on polypropylene outdoors. *Materials*, 13(7), 1626. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13071626>.
27. Mayer, J., Steinbrecher, R., Metzsch-Zilligen, E., & Pfaendner, R. (2023). Antioxidant activity of biogenic cinnamic acid derivatives in polypropylene. *Polymers*, 15(17), 3621. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15173621>.
28. Patil, R. S., Thomas, J., Patil, M., & John, J. (2023). To shed light on the UV curable coating technology: Current state of the art and perspectives. *Journal of Composites Science*, 7(12), 513. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs7120513>.
29. Petrova, L. et al. (2023). Improvement of textile materials processing techniques by applying aqueous
20. Wei L., Cappellazzi J., Manning M., McDonald A. G., Foster S., Morrell J. J. Long-Term Outdoor Weathering Evaluation of Wood Plastic Composites. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2022. Vol. 80, No. 1. P. 23–34. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01762-7>.
21. Widiastuti I., Prananda R., Putra J. A., Ananda D. R., Estriyanto Y. Optimizing the Water Absorption Behaviour and Natural Weathering Resistance of Compatibilized Ironwood-Based Recycled Polypropylene Composites. *Composites Part C: Open Access*. 2023. Vol. 12. Art. 100423. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2023.100423>.
22. Siddiqui M. N., Redhwi H. H., Andrady A. L., Furquan S. A., Hussain S. Effect of Extensive Solar Ultra-Violet Irradiation on the Durability of High-Density Polyethylene- and Polypropylene-Based Wood-Plastic Composites. *Polymers*. 2025. Vol. 17, No. 1. Art. 74. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17010074>.
23. Vasiljevs L. O., Zabarovska R., Gulevska E. et al. Changes in Wood Plastic Composite Properties after Natural Weathering and Potential Microplastic Formation. *Forests*. 2024. Vol. 15, No. 12. Art. 2102. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15122102>.
24. Wu Y.-H., Chao W.-C., Yang T.-H. et al. Surface, Physicomechanical, and Chemical Properties of Wood/Polypropylene Composites from Various Formulations after Accelerated Weathering. *BioResources*. 2023. Vol. 18, No. 3. P. 6348–6363. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.18.3.6348-6363>.
25. Yorseng K., Rangappa S. M., Parameswaranpillai J., Siengchin S. Influence of Accelerated Weathering on the Mechanical, Fracture Morphology, Thermal Stability, Contact Angle, and Water Absorption Properties of Natural Fiber Fabric-Based Epoxy Hybrid Composites. *Polymers*. 2020. Vol. 12, No. 10. Art. 2254. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12102254>.
26. Brostow W., Lu X., Gencel O., Osmanson A. T. Effects of UV Stabilizers on Polypropylene Outdoors. *Materials*. 2020. Vol. 13, No. 7. Art. 1626. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13071626>.
27. Mayer J., Steinbrecher R., Metzsch-Zilligen E., Pfaendner R. Antioxidant Activity of Biogenic Cinnamic Acid Derivatives in Polypropylene. *Polymers*. 2023. Vol. 15, No. 17. Art. 3621. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15173621>.
28. Patil R. S., Thomas J., Patil M., John J. To Shed Light on the UV Curable Coating Technology: Current State of the Art and Perspectives. *Journal of Composites Science*. 2023. Vol. 7, No. 12. Art. 513. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs7120513>.
29. Petrova L. et al. Improvement of Textile Materials Processing Techniques by Applying Aqueous

- dispersions of polymers. *Coatings*, 13(2), 462. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings13020462>.
30. Engels, H.-W. et al. (2013). Polyurethanes: Versatile materials and sustainable problem solvers for today's challenges. *Angewandte Chemie International Edition*, 52(36), 9422–9441. DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.201302766>.
31. Avar, G., Meier-Westhues, U., Casselmann, H., & Achten, D. (2012). Polyurethanes. In *Polymer science: A comprehensive reference* (Vol. 10, pp. 411–441).
32. Winter, C., Schultz, M. E. R., & Gutterres, M. (2015). Evaluation of polymer resins and films formed by leather finishing. *Latin American Applied Research*, 45(4), 213–217.
33. Plavan, V. P., Ishchenko, O. V., Tarasenko, N. V., Budash, Yu. O., & Kolodii, A. I. (2023). Zastosuvannia napovnenykh dyspersii vodorozchynnykh polimeriv dlia funktsionalizatsii voloknystykh materialiv [Application of filled dispersions of water-soluble polymers for the functionalization of fibrous materials]. *Technologies and Engineering*, 1(12), 73–85. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.1.7> [in Ukrainian].
34. Urban, D., & Takamura, K. (2002). Applications in the leather industry. In *Polymer dispersions and their industrial applications*. Weinheim: Wiley-VCH. DOI: <https://doi.org/10.1002/3527600582.ch11>.
35. Kukanja, D., Golob, J., Zupancic-Valant, A., & Krajnc, M. (2000). The structure and properties of acrylic-polyurethane hybrid emulsions and comparison with physical blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 78(1), 67–80.
36. Cheaburu, C., & Yilmaz, O. (2020). On the preparation of polyacrylic binder via mini-emulsion polymerization for leather performance coatings. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A: Applied Sciences and Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.18038/estubtda.675206>.
37. Guo, F., Aryana, S., Han, Y., & Jiao, Y. (2018). A review of the synthesis and applications of polymer–nanoclay composites. *Applied Sciences*, 8(9), 1696. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8091696>.
38. Kausar, A., Ahmad, I., Aldaghri, O. et al. (2024). Cutting-edge green nanoclay nanocomposites: Fundamentals and technological opportunities for packaging, dye removal, and biomedical sectors. *Nanocomposites*, 10(1), 159–183. DOI: <https://doi.org/10.1080/20550324.2024.2336356>.
39. Zhong, B., Tang, Y. Q., Chen, Y. L. et al. (2023). Improvement of UV aging resistance of PBAT composites with silica-immobilized UV absorber prepared by a facile method. *Polymer Degradation and Stability*, (211), 110337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polyd.2023.110337>.
- Dispersions of Polymers. *Coatings*. 2023. Vol. 13, No. 2. Art. 462. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings13020462>.
30. Engels H.-W. et al. Polyurethanes: Versatile Materials and Sustainable Problem Solvers for Today's Challenges. *Angewandte Chemie International Edition*. 2013. Vol. 52, No. 36. P. 9422–9441. DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.201302766>.
31. Avar G., Meier-Westhues U., Casselmann H., Achten D. Polyurethanes. *Polymer Science: A Comprehensive Reference*. 2012. Vol. 10. P. 411–441.
32. Winter C., Schultz M. E. R., Gutterres M. Evaluation of Polymer Resins and Films Formed by Leather Finishing. *Latin American Applied Research*. 2015. Vol. 45, No. 4. P. 213–217.
33. Плаван В. П., Іщенко О. В., Тарасенко Н. В., Будаш Ю. О., Колодій А. І. Застосування наповнених дисперсій водорозчинних полімерів для функціоналізації волокнистих матеріалів. *Технології та інженіринг*. 2023. № 1(12). С. 73–85. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.1.7>.
34. Urban D., Takamura K. Applications in the Leather Industry. *Polymer Dispersions and Their Industrial Applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1002/3527600582.ch11>.
35. Kukanja D., Golob J., Zupancic-Valant A., Krajnc M. The Structure and Properties of Acrylic-Polyurethane Hybrid Emulsions and Comparison with Physical Blends. *Journal of Applied Polymer Science*. 2000. Vol. 78, No. 1. P. 67–80.
36. Cheaburu C., Yilmaz O. On the Preparation of Polyacrylic Binder via Mini-Emulsion Polymerization for Leather Performance Coatings. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A: Applied Sciences and Engineering*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.18038/estubtda.675206>.
37. Guo F., Aryana S., Han Y., Jiao Y. A Review of the Synthesis and Applications of Polymer–Nanoclay Composites. *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8, No. 9. Art. 1696. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8091696>.
38. Kausar A., Ahmad I., Aldaghri O. et al. Cutting-Edge Green Nanoclay Nanocomposites: Fundamentals and Technological Opportunities for Packaging, Dye Removal, and Biomedical Sectors. *Nanocomposites*. 2024. Vol. 10, No. 1. P. 159–183. DOI: <https://doi.org/10.1080/20550324.2024.2336356>.
39. Zhong B., Tang Y. Q., Chen Y. L. et al. Improvement of UV Aging Resistance of PBAT Composites with Silica-Immobilized UV Absorber Prepared by a Facile Method. *Polymer Degradation and Stability*. 2023. Vol. 211. Art. 110337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polyd.2023.110337>.

<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110337>.

40. Mendes, A. O., Costa, V. L. D., Vieira, J. C. et al. (2025). UV-accelerated aging of PLA and PP-based biocomposites: A spectral and colorimetric study. *Journal of Composites Science*, 9(7), 317. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs9070317>.

41. Krauklis, A. E., Karl, C. W., Rocha, I. B. C. M., Burlakovs, J., Ozola-Davidane, R., Gagani, A. I., & Starkova, O. (2022). Modelling of environmental ageing of polymers and polymer composites: Modular and multiscale methods. *Polymers*, 14(1), 216. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14010216>.

<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110337>.

40. Mendes A. O., Costa V. L. D., Vieira J. C. et al. UV-Accelerated Aging of PLA and PP-Based Biocomposites: A Spectral and Colorimetric Study. *Journal of Composites Science*. 2025. Vol. 9, No. 7. Art. 317. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs9070317>.

41. Krauklis A. E., Karl C. W., Rocha I. B. C. M., Burlakovs J., Ozola-Davidane R., Gagani A. I., Starkova O. Modelling of Environmental Ageing of Polymers and Polymer Composites: Modular and Multiscale Methods. *Polymers*. 2022. Vol. 14, No. 1. Art. 216. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14010216>.

TYTARENKO SERHII

PhD student,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0005-6307-4482>
ResearcherID: OXC-3497-2025
E-mail: tytarenko.ss@knuutd.edu.ua

STRASHNYI VLADYSLAV

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of Department of industrial pharmacy,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9188-1821>
Scopus Author ID: 6507921131
E-mail: strashniy.vv@knuutd.edu.ua

Serhii TYTARENKO, Vladyslav STRASHNYI

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

ANALYSIS OF MODERN APPROACHES TO ENHANCING THE WEATHERING RESISTANCE OF DECORATIVE POLYMER COMPOSITES

Purpose. To identify the most effective approaches to enhancing weathering resistance, preserving performance properties, and improving the durability of decorative polymer composites.

Methodology. The study is based on a comprehensive analysis of scientific and technical literature concerning the weathering of polymer composites caused by photo-oxidative, thermo-oxidative, hydrolytic, and biological degradation, as well as modern stabilization and protection methods. Comparative analysis was used to evaluate the effectiveness of light stabilizers, antioxidants, polymer coatings, and nanoscale modifiers.

Findings. The main mechanisms of polymer composite degradation under the influence of various environmental factors were analysed. Light stabilizers, antioxidants, protective polymer coatings, and nanoscale modifiers were identified as the most widely used approaches to improving the durability of polymer composites. Integrated protection systems were found to provide the best results by simultaneously counteracting the photo-oxidative, thermo-oxidative, and moisture-induced degradation of composites.

Originality. Modern approaches to protecting polymer composites against environmental factors were summarized and systematized with consideration of the underlying material degradation mechanisms. The relationship between the nature of destructive processes and the effectiveness of different stabilization methods was demonstrated. The feasibility of using integrated multicomponent protection systems to enhance the weathering resistance of decorative polymer composites was substantiated.

Practical value. The obtained results can be used in the development of weather-resistant decorative polymer composites intended for outdoor applications.

Keywords: polymer composites; weathering; photodegradation; thermo-oxidative degradation; light stabilizers; antioxidants; polymer coatings; nanoscale modifiers; weathering resistance; durability.