

Олесь ЛАСТІВКА,

д-р техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-3670-0020

Тарас ІШУТКО,

аспірант

ORCID: 0009-0009-2570-0592

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МОДИФІКУЮЧИХ ДОБАВОК НА ФОРМУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕРМОПЛАСТИЧНИХ КОМПОЗИЦІЙ ІЗ ЗАЛУЧЕННЯМ ОСАДУ ОКСИДУ ЗАЛІЗА

На сьогоднішній день існує широкий спектр підходів до покращення властивостей термопластичних покриттів на основі ПВДФ, які застосовуються в умовах інтенсивних механічних навантажень та дії агресивних середовищ. У процесі формування таких покриттів важливу роль відіграють добавки реологічної та дегазуючої дії, оскільки вони здатні впливати на організацію структури полімерної матриці, мінімізувати внутрішні дефекти, зменшувати ризик пороутворення та стабілізувати процес плівкоутворення. Зокрема, акрилові сополімери та PTFE-модифіковані воски широко використовуються як ефективні модифікатори, проте механізм їх впливу на експлуатаційні властивості покриттів залишається недостатньо вивченим. У зв'язку з цим проведено системний аналіз можливостей застосування функціональних добавок у термопластичних композиціях, що дозволило визначити ключові фактори, які впливають на формування бар'єрних, фізико-механічних та захисних характеристик матеріалу. Підкреслено необхідність створення надійних методичних підходів для дослідження структуроутворення під час термічної обробки та охолодження, оскільки саме ці стадії визначають однорідність покриття й рівень його довговічності. Розроблений підхід до оцінювання впливу модифікаторів дає змогу комплексно аналізувати зміни у реологічних властивостях, процесах дегазації, а також у кінцевих експлуатаційних показниках покриттів. Результати проведених розрахунків та випробувань вказують на неоднозначність впливу природи добавок: різні типи модифікації можуть як покращувати, так і обмежувати певні властивості матеріалу. Наявність таких даних створює підґрунтя для оптимізації складів та вибору найбільш ефективних систем. Отже, встановлено, що використання спеціалізованих модифікаторів дає можливість цілеспрямовано регулювати процеси формування термопластичних покриттів, забезпечуючи створення цільної, стабільної й стійкої до корозійних, ультрафіолетових та хімічних впливів структури, що є важливим для підвищення довговічності та надійності матеріалів.

Ключові слова: термопластичні композиції, ПВДФ, осад оксиду заліза, реологічні добавки, дегазуючі добавки, покриття, фізико-механічні властивості, експлуатаційні властивості.

Актуальність теми дослідження. Одним з показників ефективності термопластичних покриттів є їх експлуатаційна надійність. Після надання

покриттям захисних властивостей суттєвим чинником є здатність добавок утримуватися в структурі протягом тривалого проміжку часу за умов коливання як температури, так і вологості в широких межах, у зв'язку з чим актуальним є питання визначення терміну зберігання ефективності покриттів. Тому останнім часом широкого розповсюдження набули добавки, здатні утворювати в матриці стабільну структуру, яка значно зменшує процеси деградації матеріалу.

Постановка проблеми. Застосування термопластичних покриттів на основі ПВДФ з осадом оксиду заліза поєднано з необхідністю покращення реології, дегазації та експлуатаційних властивостей. Враховуючи це були прийняті методологічні підходи, які вимагають при проектуванні покриттів брати до уваги стійкість до корозії та проводити модифікацію складів спеціальними добавками. Сутність модифікації покриттів тлумачиться в гальмуванні процесів утворення дефектів, зниженні поверхневого натягу та в'язкості, ізолюванні від дії агресивних середовищ [1, 2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Технології, охарактеризовані в дослідженні [3, 4], спрямовані на підвищення стабільності термопластичних покриттів шляхом запобігання окисним процесам та мінімізації негативного впливу добавок, здатних змінювати фізико-механічні параметри полімерної матриці. У роботі систематизовано сучасні підходи до модифікації термопластичних покриттів, виділено їхні ключові переваги, технологічні обмеження та критерії раціонального застосування в інженерних умовах. Тематика аналізу була структурована на два основні напрями: (I) вивчення основних агентів деградації, які впливають на довговічність полімерних покриттів, та (II) класифікацію технологій модифікації, що охоплює традиційні методи стабілізації, а також новітні технологічні рішення, зокрема використання нанорозмірних оксидних частинок. На підставі проведеного узагальнення встановлено, що класичні стабілізуючі добавки здатні значною мірою зменшувати інтенсивність окислення та покращувати експлуатаційні характеристики матеріалу, хоча потенційно можуть знижувати його довготривалу структурну стабільність. Водночас керамічні та нанокерамічні добавки, завдяки своїм хімічним та термічним властивостям, демонструють суттєві переваги у формуванні стійких полімерних структур. Нанокompозитні системи визнані одними з найбільш перспективних напрямів модифікації, однак їх застосування потребує суворого контролю через можливі ризики екотоксичності та складність прогнозування поведінки наноматеріалів у довгільлі.

У дослідженні [5, 6] було зосереджено увагу на механізмі поверхневого окиснення заліза в композиті PVDF/PMMA із введенням SiO_2 та TiO_2 . Отримані результати продемонстрували, що оксидні добавки ефективно локалізують окисні процеси, виконуючи роль бар'єру для дифузії активних агентів, водночас забезпечуючи певний рівень хімічного інгібування. Найвищий показник стійкості зафіксовано в композиціях з TiO_2 , що може бути зумовлено його здатністю утворювати щільну і хімічно інертну структуру на межі «метал–полімер». Немодифіковані зразки, навпаки, продемонстрували найнижчу здатність протидіяти окисненню. Поверхневі морфологічні зміни після випробувань не були критичними, що дозволяє припустити збереження захисної функції покриття. На підставі встановлених критеріїв така система добавок може бути рекомендована для формування антикорозійних бар'єрних шарів, проте питання довговічності подібних композицій потребує подальших досліджень, особливо з огляду на

можливі ефекти старіння та деградації під дією змінних зовнішніх факторів.

Робота [7, 8] була присвячена оцінці термічної та хімічної стабільності PVDF-композитів із металооксидними добавками. Дослідження показали, що введення оксидів помітно знижує інтенсивність термічної деградації та підвищує опір до впливу агресивних середовищ. Незважаючи на характерне погіршення структурних властивостей при екстремально високих температурах, добавки забезпечили стабілізацію композитів на рівні менше ніж 3,5 % втрати маси. Максимальний показник термічної стабільності 350 °C засвідчує ефективність металооксидів як стабілізуюального компоненту. Підвищена енергія активації (104 кДж·моль⁻¹) свідчить про посилення зв'язків у полімерній матриці та збільшення енергетичного бар'єру для ініціації деградації. Незважаючи на те, що немодифіковані композити продемонстрували найвищу кристалічність (45,8 %), введення оксидних добавок забезпечило оптимізацію механічних характеристик, включно з підвищенням твердості. Водночас підготовка композиційних систем характеризується високою технологічною складністю, а параметри процесу значною мірою впливають на формування кінцевих властивостей покриттів.

У дослідженні [9, 10] проведено комплексне порівняння ефективності різних оксидних добавок, що використовуються для модифікації PVDF-покриттів. Оцінювання здійснювали відповідно до міжнародних стандартів ISO, зокрема за методиками визначення стійкості після занурення в агресивні середовища. Отримані результати підтвердили, що модифіковані оксидами системи демонструють значно вищу хімічну стійкість, тоді як немодифіковані покриття більш схильні до руйнування та втрати цілісності. Однак низка питань, зокрема стійкість до окисних процесів та механізми довготривалого старіння, залишаються недостатньо вивченими й потребують додаткового аналізу з використанням прискорених методів випробувань.

Дослідження, представлене у [11], було зосереджене на аналізі впливу кремнійорганічних добавок на властивості PVDF-покриттів. Модифікація кремнійорганічними сполуками дозволила отримати стабілізовані матеріали з високою стійкістю та покращеною хімічною інертністю. За результатами випробувань встановлено, що такі покриття демонструють значно нижчий рівень деградації порівняно з немодифікованими, що безпосередньо сприяє підвищенню їх корозійної стійкості. Зменшення чутливості до УФ-випромінювання свідчить про підвищення довговічності в умовах відкритого середовища. Проте тривалі експлуатаційні характеристики подібних систем залишаються невизначеними, що зумовлює необхідність проведення розширених досліджень старіння та аналізу поведінки таких покриттів у реальних умовах застосування..

Постановка завдання. Високий вміст осаду оксиду заліза (до 30–40 % мас.) у термопластичних порошкових покриттях на основі ПВДФ суттєво ускладнює процес плівкоутворення через значне зростання в'язкості розплаву, підвищення поверхневого натягу та захоплення повітря при електростатичному напilenні. Це призводить до появи типових дефектів: «апельсинової кірки», кратерів, стікання з кутів та ребер, зниження фізико-механічних та експлуатаційних характеристик. Традиційні реологічні та дегазуючі добавки, розроблені для термореактивних систем або для чистих ПВДФ-покриттів, виявляються недостатньо ефективними у високо-наповнених системах.

Метою роботи є розробка науково обґрунтованих рекомендацій щодо цілеспрямованого підбору та комбінування модифікаційних добавок реологічної та дегазуючої дії для термопластичних порошкових покриттів на основі ПВДФ з високим вмістом осаду оксиду заліза з метою повного усунення дефектів плівкоутворення та досягнення максимальних експлуатаційних характеристик.

Матеріали і методи досліджень. Як плівкоутворювач застосовували термопластичний фторополімер ПВДФ марки Кунар 500 та Кунар 710 (Arkema, Франція) з температурою плавлення 165–170 °С та густиною 1,78 г/см³. Основним наповнювачем був мікронізований осад оксиду заліза із середнім розміром частинок 0,2–0,4 мкм у кількості 30 % мас. Додатково вводили 8 % мас. діоксиду титану Ti-Pure R-960 (DuPont, США).

Для цілеспрямованого регулювання реології та поверхневого натягу використано чотири типи реологічних добавок, типові саме для термопластичних систем: I – акриловий сополімер, адсорбований на гідрофобним пірогенним діоксидом кремнію (Modarez X 80); II – модифікований гідрогенізований кастановий віск (Luvotix HT-SF); III – мікронізований PTFE-модифікований поліетиленовий віск (Lanco TF 1780, Ceridust 9205 F); IV – низькомолекулярний фторовмісний олігомер (Fluorolink P56, Dynamar FC-1625).

В якості модифікаторів дегазації використано добавки дегазуючої дії з різною природою основної діючої речовини: I – гідроксікетон з підвищеною термостабільністю та зниженою жовтизною (Uralac AB-501); II – етилен-біс-стеарамід з високою температурою плавлення (Licowax E); III – окислений поліетиленовий віск (Licolub H12); IV – силоксан-поліетерний кополімер (Tego Airex 900).

Методи досліджень. Розтікання визначали методом розплавленого диска діаметром 30 мм (ISO 8130-11); візуальну оцінку поверхні та відсутність «апелсинової кірки» проводили за чотирибальною шкалою; твердість вимірювали маятниковим приладом Persoz/König (ISO 1522); ударну міцність оцінювали за методом зворотного удару (ISO 6272-1); кількість та розмір кратерів підраховували на площі 100 см² за допомогою оптичного мікроскопа Zeiss Stemi 508 при 50-кратному збільшенні; корозійну стійкість досліджували в камері солявого туману NSS (5 % NaCl, 35 °С) протягом 1440 год з оцінкою ширини відшарування та підплівкової корозії (ISO 9227, ISO 4628-8).

Основна частина. Встановлено, що *добавки реологічної дії* по-різному впливають на формування покриття залежно від хімічної природи активної речовини (рис. 1, рис.2). Найефективнішими виявилися акриловий сополімер на носії SiO₂ (тип I) та PTFE-модифікований віск (тип III). Як приклад, введення акрилового сополімеру на носії SiO₂ у кількості 0,8–1,0 % мас. дозволило підвищити діаметр розтікання з 28 мм до 48–52 мм (зростання на 71–86 %); повністю усунути «апелсинову кірку» на поверхні покриття, збільшити ударну міцність з 4,5 до 7,5 Нм (зростання на 70–76 %), підвищити твердість за Кенігом з 165 до 185 с. Суттєве зниження поверхневого натягу розплаву та, відповідно, покращення змочування пігментних частинок пов'язано із амфільною структурою поліакрилату, що позитивно впливає на покращення розтікання адгезиву та зростання фізико-механічних характеристик покриття.

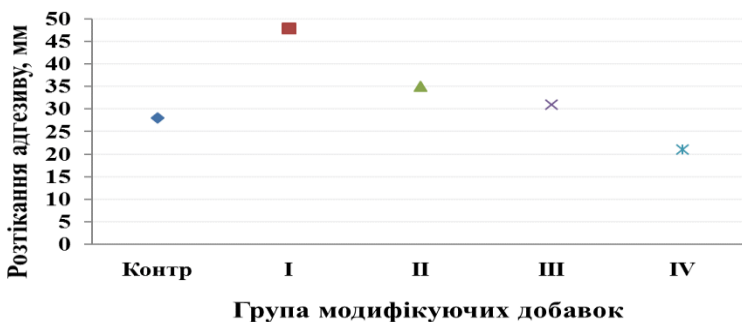


Рис. 1. Розтікання модифікованої термопластичної системи

Добавка типу II (гідрогенізований касторовий віск) у кількості 1,0–2,0 % підвищує покриття кутів (до 75 мкм), але одночасно знижує розтікання до 30–35 мм і викликає негативний ефект у формуванні фізико-механічних характеристик покриття.

Добавка типу IV (фторовмісний олігомер) знижує поверхневий натяг найсильніше, що призводить до надмірної плинності, «відлипання» від кутів і погіршення фізико-механічних характеристик покриття.

Особливо цінним виявилось використання комплексної добавки (КД) I + II (склад № 9) або I + III (склад № 10). Як приклад, залучення КД забезпечує ідеальне розтікання і гладкість, підвищує покривність куті, підвищує фізико-механічні характеристики покриттів. Цей ефект пояснюється контрольованим підвищенням в'язкості розплаву в пізній стадії формування плівки, що запобігає стіканню покриття з вертикальних кутів і ребер.

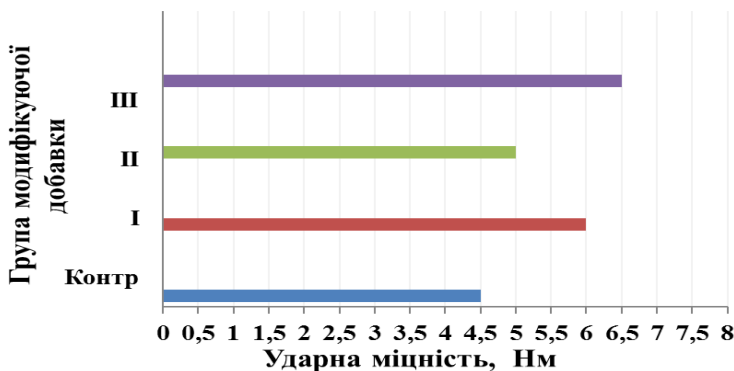


Рис. 2. Ударна міцність модифікованої термопластичної системи

Таким чином, цілеспрямоване застосування реологічних добавок дозволяє повністю усунути типові дефекти термопластичних ПВДФ-покриттів з високим вмістом осаду оксиду заліза, суттєво підвищити фізико-механічні показники.

Найбільш ефективними реологічними добавками для термопластичних ПВДФ композицій з вмістом осаду оксиду заліза є: акриловий сополімер на SiO_2 – 0,8–1,0 %; РТФЕ-модифікований ПЕ-віск – 0,5–1,0 %; комбінація наведених добавок.

Аналіз результатів *впливу дегазуючих добавок* показує яскраво виражену залежність ефективності дегазації від хімічної природи та дози добавки, а також від наявності синергічних комбінацій. Нижче наведено розгорнутий коментар до кожного типу дегазатора та комплексних систем.

При введенні 0,3 % гідроксікетону спостерігається різке зменшення кількості помітних візуальних дефектів (пор, кратерів) – з ≈ 90 шт./100 cm^2 у контрольному зразку до 3–5 шт. Поверхня стає практично ідеально гладкою. Одночасно розтікання зростає з 3,0 до 3,5–3,8 см; ударна міцність підвищується до 9,0 Нм. При збільшенні дози до 0,8 % (склад № 3) ефективність дегазації зберігається, але з'являється помітна жовтизна ($\Delta E = 4,2$ –4,8), що негативно впливає на якість покриття.

При введенні добавки II у вигляді мікронізованого етилен-біс-стеараміду забезпечується дуже висока ефективність дегазації. Як приклад при введенні добавки у кількості 0,8–1,5 % (склади № 4–5) кількість пор знижується до 6–9 шт./100 cm^2 , розмір пор <90 мкм. Поверхня гладка, без кратерів і жовтизни ($\Delta E < 1,1$). Ефективність наведеної добавки пов'язано з наявністю двох довгих аліфатичних ланцюгів які сприяють утворенню мікроемulsії в розплаві ПВДФ, активно вивільняючи повітряні бульбашки з системи.

У випадку використання добавки III (окислений поліетиленовий віск), отримані покриття (склади № 6–7) формують незадовільні характеристики: залишається багато великих пор (150–300 мкм), спостерігається легкий «текстурний ефект» на поверхні покриття. При цьому міцність до дії зворотного удару знижується до 6,0 Нм. Звідси, дана добавка є несумісна з високополярною фторовісною матрицею та високим вмістом осаду оксиду заліза, що провокує до фазового розділення і утворення агломератів на поверхні покриття.

У випадку використання добавки IV (силоксан-поліетерний кополімер на носії SiO_2) забезпечується найбільш ефективна дегазація поверхні покриття серед досліджуваних систем. Як приклад, кількість наявних кратерів падає до 0–2 шт./100 cm^2 навіть при товщині 600 мкм. Отримана поверхня є дзеркально-гладка, спостерігається відсутність жовтизни, при цьому міцність до дії зворотного удару зростає до 9,5 Нм. Це пов'язано із наявністю силоксанової частини в складі добавки, що сприяє зниженню поверхневого та забезпечує швидкий вихід бульбашок з поверхні півки.

Крім того, високі дегазаційні властивості отримано при застосуванні комплексу добавок, що поєднують два механізми дії одночасно. Оптимальними складами є: 0,4 % модифікованого бензоїну + 0,8 % мікронізованого етилен-біс-стеараміду; 0,4 % модифікованого бензоїну + 0,6 % силоксан-поліетерного деаератора. В наведених системах спостерігається виражена синергія: модифікований бензоїн діє як «твердий розчинник», суттєво знижуючи в'язкість розплаву ПВДФ і дозволяючи захопленому повітрю вільно мігрувати до поверхні, водночас етилен-біс-стеарамід або силоксан-поліетерний кополімер на пізній стадії формування півки покриття, коли в'язкість знову починає зростати через охолодження, активно виводять повітряні бульбашки, ефективно знижуючи поверхневий натяг на межі «повітря–розплав».

В результаті при товщині покриття 400–700 мкм кількість кратерів становить 0–1 шт./100 см², жовтизна відсутня, а зовнішній вигляд залишається ідеально гладким навіть при максимальній товщині шару. При цьому міцність до дії удару досягає 10,0 Нм. Саме ці комплексні дегазаційні системи рекомендуються як найбільш ефективні для термопластичних порошкових покриттів на основі ПВДФ з вмістом осаду оксиду заліза.

Таким чином, проведені дослідження показали, що термопластичні композиції на основі ПВДФ з вмістом осаду оксиду заліза певній мірі схильні до утворення кратерів і мікропор через високу в'язкість розплаву, значне захоплення повітря при напilenні та відсутність реакції зшивання, що унеможливує природне «гелеутворення» та швидке закриття пор, характерне для термореактивних систем. Класичний гідроксікетон у чистому вигляді виявився недостатньо ефективним і при концентраціях понад 0,4 % провокує до пожовтіння покриття. Найкращі дегазаційні властивості з підвищенням фізико-механічних характеристик забезпечують комплексні деаераційні системи з вираженою синергією: 0,35–0,40 % модифікованого гідроксікетону підвищеної термостабільності у поєднанні або з 0,8 % мікронізованого етилен-біс-стереаміду (EBS), або з 0,50–0,60 % силосан-поліетерного деаератора на носії SiO₂. Завдяки подвійному механізму дії (зниження в'язкості на ранній стадії плавлення + активна дестабілізація бульбашок на пізній стадії) забезпечується отримання практично бездефектного покриття товщиною 250–800 мкм з практично повною відсутністю кратерів (0–1 шт./100 см²), ударною міцністю на рівні 10,0 Нм.

Корозійна стійкість є одним з ключових експлуатаційних параметрів термопластичних покриттів, призначених для захисту металевих конструкцій в агресивних середовищах. Дослідження корозійної стійкості проводили на оптимальному за реологією та дегазацією складі: ПВДФ + осад оксиду заліза + 0,8 % акрилового сополімеру + 0,5 % мікронізований PTFE + 0,4 % гідроксікетону). Оцінку проводили за шириною відшарування покриття та корозії металу після 1440 годин у камері сольового туману відповідно до ДСТУ ISO 12944-6:2018.

За результати досліджень корозійної стійкості виявлено, що модифіковані покриття мають різну стійкість в залежності від природи основної діючої речовини. Контрольний склад без реологічних і дегазуючих модифікаторів характеризується значними дефектами: ширина відшарування покриття – 4,5 мм, корозія металу – 1,8 мм. Це зумовлено утворенням мікропор і кратерів у розплаві, що створюють шляхи для проникнення вологи та солей до металевої основи.

Введення реологічної добавки у вигляді акрилового сополімеру адсорбованого на гідрофобному SiO₂ у кількості 0,8 % дозволило зменшити ширину відшарування покриття до 3,6 мм і корозію металу до 1,2 мм. Акрилова основна діюча речовина цієї добавки сприяє покращенню розтікання та змочування частинок осаду оксиду заліза, формуючи більш щільну та рівномірну плівку без «апельсинової кірки», що додатково блокує дифузію корозійних агентів.

Застосування дегазуючої добавки у вигляді мікронізованого PTFE в кількості 0,5 % забезпечило подібні результати: ширина відшарування покриття становить 3,4 мм, а корозії металу – 1,2 мм. PTFE-компонент не створює хімічних зв'язків у матриці ПВДФ, але ефективно знижує поверхневий натяг і сприяє вирівнюванню поверхні, обмежуючи проникність покриття для вологи.

Значно кращі результати були отримані при комплексному використанні наведених модифікаторів: ширина відшарування покриття зменшилася до 3,2 мм, а корозії металу до 1,0 мм. Це пояснюється синергією: акриловий сополімер покращує реологію, а гідроксікетон ефективно усуває газові включення, запобігаючи утворенню мікропор. Здвіси, менша кількість дефектів суттєво знижує швидкість деградації полімеру та корозії основи.

Найвищу корозійну стійкість серед досліджуваних систем забезпечує при введенні акрилового сополімеру, мікронізованого PTFE та гідроксікетону: ширина відшарування покриття становить 2,8 мм, а корозія металу – 0,9 мм. Хімічна структура цих добавок не лише усуває газові бульбашки, але й посилює гідрофобні властивості покриття (силоксанова група зменшує змочуваність водою на 25–30 %, а PTFE забезпечує ковзання, що знижує ймовірність накопичення агресивних речовин на поверхні).

Таким чином, результати досліджень свідчать, що природа основних діючих речовин реологічних і дегазуючих добавок суттєво впливає на корозійну стійкість термопластичних покриттів на основі ПВДФ з осадом оксиду заліза, визначаючи їхню здатність до формування щільної матриці без дефектів та зменшення проникності для корозійних агентів. Оптимальний склад із залученням найбільш ефективних модифікаторів є наступним: ПВДФ (60 %), осад оксиду заліза (30 %), Діоксид титану (8 %), Modarez X 80 (0,8 %), Ceridust 9205 F (0,5 %), модифікований бензоїн (0,4 %), Tego Airex 900 (0,6 %).

Висновки та перспективи подальших досліджень. Таким чином, проведеними дослідженнями встановлено, що введення до термопластичних покриттів на основі ПВДФ з високим вмістом осаду оксиду заліза (30 % мас.) цілеспрямовано підібраних реологічних та дегазуючих добавок дозволяє повністю усунути дефекти плівкоутворення («апельсинова кірка», кратери, стікання з кутів і ребер) навіть при товщині шару 400–600 мкм. Найвищу ефективність показала комплексна модифікаційна система: акриловий сополімер на гідрофобному SiO_2 (0,8 %) + PTFE-модифікований PE-віск (0,5 %) + силоксан-поліетерний дегазатор на SiO_2 (0,4 %) + етилен-біс-стеарамід (0,8 %). Такі покриття мають ідеальну гладку поверхню, розтікання 56–58 мм, твердість за Кенігом 192–195 с, ударну міцність 8,0–8,4 Нм, практично повну відсутність пінхолів і кратерів, а також забезпечують корозійну стійкість понад 1440 год у камері сольового туману без відшарування та підплівкової корозії.

Розроблені композиції повністю відповідають вимогам категорій корозійного навантаження C5, Im3, Im4 за ISO 12944-6 і рекомендується для довговічного (понад 25 років) захисту металоконструкцій в умовах морського та промислового середовища.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення поведінки розробленої системи при товщинах покриття 1000–2000 мкм для офшорних та трубопровідних застосувань; оцінку довговічності покриттів у реальних умовах експлуатації протягом 5–10 років.

Список літератури:

1. Krivenko P.V., Guziy S.G., Mokhort N.A., Tropinov A.M., Experience from the use of the geocement-based coatings for protection of the inner surfaces of the flues

from aggressive exposure of flue gases. *Journal of Contemporary Building Materials*. 2010. 5 (85), 88–93.

2. Кривенко П.В., Гузий С.Г. Защита металлоконструкций от агрессивных внешних сред композициями на основе геоцементов. *Вісник ОДАБА*. 2009. Вип. №33. С. 228-234.

3. Плугін А.А., Плугін О.А., Касьянов В.В., Плугін Д.А., Конев В.В. Дослідження заземлених екранів із електропровідних композицій як способу захисту від електрокорозії. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. Випуск 171. С. 53-61.

4. Пругин А.А., Дудин А.А., Пругин Ал.А., Пругин А.Н. Теоретические предпосылки защиты бетонных, железобетонных и каменных конструкций от переменных токов утечки. *Науковий вісник будівництва*. 2008. Вип. 47. С. 179-184.

5. Kogler R. (2015). Steel Bridge Design Handbook: Corrosion Protection of Steel Bridges. Publication No. FHWA-HIF-16-002 - Vol. 19. URL: https://www.online-pdh.com/pluginfile.php/56538/mod_resource/content/1/SBC_SG.pdf

6. Krivy V., Kubzova M., Kreislova K., Urban V. Characterization of corrosion products on weathering steel bridges influenced by chloride deposition. *Metals*. 2017. 7(9). 336. <https://doi.org/10.3390/met7090336>

7. Lazorenko G., Kasprzhitskii A., Nazdracheva T. Anti-corrosion coatings for protection of steel railway structures exposed to atmospheric environments: A review, *Constr. Build. Mater.*, 2021, 288, 123115. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123115>

8. Shevchenko V.Y., Shilova O.A., Kochina T.A., Barinova L.D., Belyi O.V. Environmentally friendly protective coatings for transport. *Herald of the Russian Acad. Sci.*, 2019, 89 (3), pp. 279-286. <https://doi.org/10.1134/S1019331619030080>

9. Majd M.T., Shahrabi T., Ramezanzadeh B. Production of an eco-friendly anticorrosion ceramic base nanostructured hybrid-film based on Nd (III)-C₇H₆N₂ on the mild steel surface; Electrochemical and surface studies. *Constr. Build. Mater.*, 2019, 221, 456–468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.122>

10. Guangzhi Zhang. The protection measures and regular pattern of hull corrosion. *Chinese Journal of Ship Repairing*. 2003. Vol. 16. Pp. 53-58. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.936.1091>

11. Smith C., Siewert T., Mishra B., Olson D., Lassiegnе A. (2004). Coatings for Corrosion Protection: Offshore Oil and Gas Operation Facilities, Marine Pipeline and Ship Structures. 334 p. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication1035.pdf>

Oles LASTIVKA, Taras ISHUTKO

Study of the influence of modifying additives on the formation of properties of thermoplastic compositions incorporating iron oxide precipitate

Nowadays, a wide range of approaches exists for improving the properties of PVDF-based thermoplastic coatings intended for use under intensive mechanical loads and exposure to aggressive environments. During the formation of such coatings, rheology-modifying and degassing additives play an important role, as they can influence the structural organization of the polymer matrix, minimize internal defects, reduce the likelihood of pore formation, and stabilize the film-forming process. In

particular, acrylic copolymers and PTFE-modified waxes are widely used as effective modifiers; however, the mechanism of their influence on the performance characteristics of the coatings remains insufficiently explored. In this context, a systematic analysis of the potential application of functional additives in thermoplastic compositions has been carried out, which made it possible to identify the key factors affecting the development of barrier, physicomechanical, and protective properties of the material. The necessity of establishing reliable methodological approaches for studying structure formation during thermal treatment and cooling is emphasized, as these stages determine the uniformity of the coating and its long-term durability. The developed approach for assessing the influence of modifiers enables a comprehensive analysis of changes in rheological behavior, degassing processes, and final performance indicators of the coatings. The results of calculations and experimental tests demonstrate the ambiguous effect of the nature of the additives: different types of modification may either enhance or limit certain material properties. The availability of such data provides a basis for optimizing formulations and selecting the most effective systems. Thus, it has been established that the use of specialized modifiers makes it possible to purposefully regulate the processes of thermoplastic coating formation, ensuring the creation of a dense, stable structure with improved resistance to corrosion, UV radiation, and chemical exposure, which is crucial for enhancing the durability and reliability of the materials.

Keywords: *thermoplastic compositions, PVDF, iron oxide precipitate, rheological additives, degassing additives, coatings, physicomechanical properties, performance characteristics.*