

УДК 621.45.038.7; 620.193.2

ВПЛИВ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВКОУТВОРЮВАЧІВ НА ВЛАСТИВОСТІ АНТИКОРОЗІЙНИХ ПОРОШКОВИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ЗАЛІЗОБЕТОНУ

INFLUENCE OF POLYMER FILM-FORMERS ON PROPERTIES OF ANTI-CORROSION POWDER COATINGS FOR REINFORCED CONCRETE

Ластівка О.В., д.т.н., професор, ORCID: 0000 – 0002 – 3670 - 0020; Самченко Д.М., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-3305-8180; Томін О.О., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-2830-9419, (Київський національний університет будівництва і архітектури).

Lastivka O.V., D.Sc. (Tech.), professor, ORCID: 0000-0002-3670-0020; Samchenko D.M., PhD, associate professor, ORCID: 0000-0003-3305-8180; Tomin O.O., PhD, associate professor, ORCID: 0000-0002-2830-9419 (Kyiv National University of Construction and Architecture).

У статті вирішується науково-практичне завдання підвищення довговічності залізобетонних конструкцій шляхом застосування екологічно безпечних 100% твердих порошкових лакофарбових матеріалів. Досліджено вплив хімічної будови та молекулярної маси різних термопластичних плівкоутворювачів на реологічні процеси формування плівки та фізико-механічні властивості покриттів. Експериментально встановлено, що зі збільшенням молекулярної маси полімерів зростає поверхневий натяг їх розплаву та суттєво знижується здатність до розтікання по субстрату, що негативно позначається на адгезії. Доведено, що оптимальний баланс коалесценції та міцності (адгезія 9,1 МПа) забезпечує використання полівініліденфториду (ПВДФ) з молекулярною масою 40 000 г/моль.

The article is devoted to the study of the influence of the chemical structure and molecular weight of thermoplastic polymer film-formers on the physical and mechanical properties of powder coatings intended for the anti-corrosion protection of reinforced concrete structures. Reinforced concrete remains the most widespread building material globally due to its technological advantages, but it is highly susceptible to corrosion under aggressive environmental influences. Because concrete has a porous structure, corrosion processes

propagate deep into the composite, making impermeability a crucial factor for durability. This necessitates the use of secondary protection systems, such as polymer coatings, to create an effective barrier. Modern environmental standards and economic factors dictate a transition towards 100% solid powder coating materials, which align with the 4E principle (ecology, economy, energy saving, efficiency). The research evaluates a diverse range of thermoplastic polymers, including polyvinyl chloride (PVC), polyvinylidene fluoride (PVDF), polyethylene (PE), polypropylene (PP), nylon, and saturated polyesters. The film formation process was investigated by measuring the surface tension of polymer melts using a modified Wilhelmy method in an argon atmosphere, assessing the spreading of the adhesive on the substrate according to ISO standards, and determining mechanical adhesion via pull-off testing and impact resistance. The results demonstrate that increasing the molecular weight of the polymer generally increases the surface tension of the melt. This inhibits the initial coalescence of powder particles and reduces spreading on the substrate, consequently lowering the mechanical bonding strength. Among the evaluated polymers, PVDF with a molecular weight of 40,000 g/mol exhibited the optimal combination of rheological and mechanical properties, achieving an adhesion strength of 9.1 MPa and an impact resistance of 2.0 Nm. The exceptional high performance of PVDF is directly attributed to the extremely strong carbon-fluorine bonds (116 kcal/mol) inherent in its molecular structure. The study concludes that the efficiency of thermoplastic film-formers in powder coating systems generally increases in the following sequence: PP < Nylon < PE < PVC < Saturated Polyester < PVDF. These findings provide a scientific foundation for the rational selection of raw materials in the formulation of highly durable, eco-friendly protective coatings for reinforced concrete structures operating in severely aggressive environments

Ключові слова: залізобетонні конструкції; корозія; порошкові лакофарбові матеріали; термопластичні полімери; адгезія; молекулярна маса reinforced concrete structures; corrosion; powder coating materials; thermoplastic polymers; adhesion; molecular weight.

Вступ. Завдяки відносно невисокій вартості, доступності сировинної бази та високій технологічності, що дозволяє створювати конструкції практично будь-якої складності, залізобетон залишається домінуючим будівельним матеріалом у сучасному світовому будівництві [1]. Проте досвід експлуатації будівель та споруд свідчить про те, що залізобетонні елементи мають обмежений термін служби через високу вразливість до агресивних чинників довкілля. На відміну від металевих конструкцій, де корозійні процеси локалізуються переважно на поверхні, бетон має капілярно-пористу структуру. Це сприяє безперешкодній дифузії вологи, хлоридів та

вуглекислого газу вглиб матеріалу, що призводить до карбонізації бетону та ініціювання електрохімічної корозії арматурного каркаса.

Забезпечення довговічності таких об'єктів вимагає впровадження систем вторинного захисту, що створюють надійний бар'єр на межі «середовище–бетон». Традиційні лакофарбові системи на основі органічних розчинників поступово втрачають актуальність через їхню високу токсичність та пористість захисної плівки, що утворюється після випаровування розчинника. Відповідно до Закону України «Про забезпечення хімічної безпеки та управління продукцією» [2] та світових екологічних трендів, пріоритетним напрямком є розробка та впровадження 100% твердих систем — порошкових лакофарбових матеріалів (ПЛМ). Застосування ПЛМ повністю відповідає концепції «4Е» (екологія, економія, енергозбереження, ефективність експлуатації), забезпечуючи формування монолітного, безпористого та ресурсоекономного захисного покриття, що є критично важливим для захисту пористих будівельних композитів [3].

Огляд останніх досліджень та публікацій. Проблематика підвищення корозійної стійкості залізобетону є предметом постійної уваги провідних вчених. У працях [4] ґрунтовно досліджено механізми проникнення агресивних агентів у бетонну матрицю та доведено, що проникність бетону є визначальним чинником його довговічності. Автори робіт [5, 6] наголошують на ефективності використання полімерних мембран для «запечатування» пор бетону, проте вказують на проблему низької адгезії традиційних фарб до вологого або нерівного бетонного субстрату.

Питання формування структури порошкових покриттів на металевих поверхнях детально висвітлені у класичних дослідженнях реології полімерних розплавів [8]. Теоретичні основи коалесценції частинок та їх розтікання базуються на рівняннях Нікса та Доджеса, де ключову роль відіграє баланс між в'язкістю та поверхневим натягом:

$$t = f\left(\frac{\eta R_c}{\gamma}\right),$$

де, η - в'язкість, R_c - середній радіус кривизни (з діаметром частинок, в якості першої апроксимації), γ - поверхневий натяг. Для мимовільного розтікання полімеру коефіцієнт змочування (S) повинен бути позитивним:

$$S = \gamma_s - \gamma_L - \gamma_{SL} > 0$$

де, γ_s - поверхневий натяг субстрату, γ_L - поверхневий натяг розплаву полімеру, γ_{SL} - міжфазний натяг між розплавом полімеру та субстратом.

Сучасні дослідження термопластичних плівкоутворювачів, таких як ПВДФ та насичені полієфіри [9], вказують на їх високу хімічну інертність та стійкість до ультрафіолету, що робить їх перспективними для зовнішнього захисту споруд. Проте, незважаючи на значний обсяг досліджень, питання впливу молекулярної маси термопластів на адгезійні та реологічні параметри при формуванні покриттів на залізобетоні залишаються дискусійними. Зокрема, потребує уточнення вибір оптимальних параметрів плівкоутворювачів, які б

забезпечували максимальне змочування бетонної поверхні за мінімальних температурних навантажень [10].

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є теоретичне і експериментальне обґрунтування впливу хімічної будови та молекулярної маси термопластичних плівкоутворювачів на процеси формування структури, реологічні властивості та механічне зчеплення порошкових лакофарбових композицій на поверхні субстрату.

Матеріали і методи досліджень. В експериментах використано термопластичні полімери: вінілові (ПВХ, ПВДФ), поліолефінові (ПЕ, ПП), поліамідні (нейлон) та насичені полієфіри. Нанесення здійснювали електростатичним способом за допомогою розпилювального пістолету Start 50 при напрузі 70 кВ. Молекулярну масу визначали методом гель-проникаючої хроматографії. Поверхневий натяг розплавів вимірювали модифікованим методом Вільгельмі в атмосфері аргону. Розтікання адгезиву визначали за ДСТУ ISO 8130-11:2019, адгезію на відрив – за ДСТУ ISO 4624:2019, а міцність до дії удару – за ДСТУ ISO 6272-2:2015.

Результати досліджень. Формування півки порошкових лакофарбових матеріалів (ПЛМ) відбувається шляхом нагрівання частинок порошку під дією температури в межах 180...350 °С, залежно від хімічної природи плівкоутворювача. Окремі частинки плавляться і розтікаються по поверхні субстрату, після чого розплав вирівнюється до гладкої поверхні та твердіє. Згідно з рівнянням Нікса та Доджеса, швидкість коалесценції частинок зростає при збільшенні поверхневого натягу та зменшується зі збільшенням в'язкості розплаву. Водночас для ефективного мимовільного розтікання полімеру по субстрату поверхневий натяг розплаву має бути мінімальним. Це створює протилежні вимоги до поверхневого натягу на різних етапах формування півки, що потребує ретельного підбору молекулярної маси плівкоутворювача.

Дослідження впливу хімічної будови та молекулярної маси термопластичних плівкоутворювачів на формування півки полімерної матриці проводилося на кількох групах полімерів (рис. 1).

Для систем на основі полівінілхлориду (ПВХ) встановлено, що зростання молекулярної маси провокує погіршення реологічних властивостей та зниження міцності системи. Найбільш ефективним є застосування ПВХ із молекулярною масою на рівні 20 000 г/моль: поверхневий натяг становить 38,9 мДж/м², розтікання адгезиву — 4,1 мм, адгезія — 7,9 МПа, ударна міцність — 1,5 Нм. Збільшення маси до 60 000 г/моль підвищує поверхневий натяг до 39,4 мДж/м², що знижує розтікання до 2,5 мм та адгезію до 6,1 МПа. Використання ПВХ з масою 100 000...120 000 г/моль призводить до отримання вкрай крихкого покриття (адгезія 0,9...2,8 МПа) через суттєве зростання поверхневого натягу (до 40,5 мДж/м²) та енергії зв'язків у ланцюзі.

Вінілові плівкоутворювачі (ПВХ та ПВДФ). Серед досліджуваних вінілових полімерів полівініліденфторид (ПВДФ) продемонстрував найвищі

результати. Системи на його основі характеризуються меншим поверхневим натягом порівняно з ПВХ завдяки наявності флуорних (-CF₂) груп. Високі експлуатаційні властивості ПВДФ забезпечуються надзвичайно міцним вуглець-фторовим зв'язком (116 ккал/моль). Найкращі показники зафіксовано при молекулярній масі 40 000 г/моль: поверхневий натяг 28,0 мJ/m², розтікання 6,7 мм, адгезія 9,0 МПа, ударна міцність 2,0 Нм. Зниження маси ПВДФ до 20 000 г/моль хоч і підвищує адгезію (9,2 МПа), але призводить до надмірного розтікання (9,7 мм), що провокує утворення напливів та погіршує якість поверхні. З іншого боку, збільшення маси до 80 000 г/моль підвищує ступінь кристалічності полімеру, що різко знижує розтікання (2,2 мм) та адгезію (0,6 МПа).

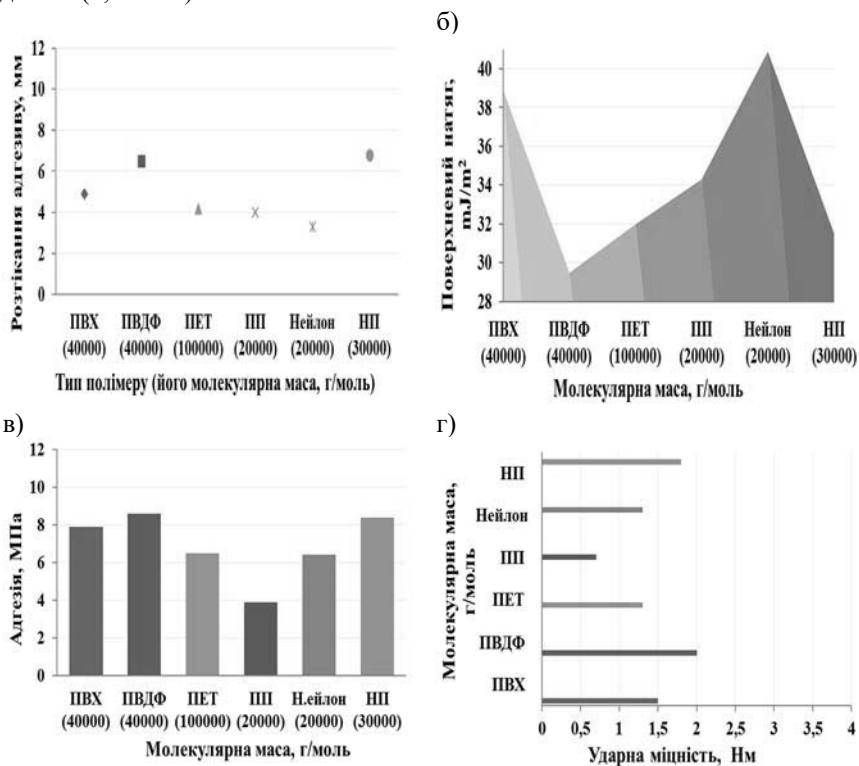


Рис.1. Узагальненні результати досліджень полімерної матриці на основі різного типу плівкоутворювача за показниками: а) розтікання адгезиву; б) поверхневий натяг; в) адгезія; г) ударна міцність.

Поліолефінові системи (ПЕ та ПП). При використанні поліетилену (ПЕ) високої щільності оптимальні показники механічного зчеплення досягаються при молекулярній масі 200 000 г/моль (адгезія 6,4 МПа, ударна міцність 1,5

Нм). Використання ПЕ низької щільності з масою 90 000 г/моль забезпечує краще розтікання (4,2 мм) та адгезію (6,8 МПа), проте знижує жорсткість та стійкість покриття до стирання.

Поліпропілен (ПП) продемонстрував найнижчі механічні властивості серед усіх досліджуваних систем незалежно від молекулярної маси. Це зумовлено наявністю неполярних метильних (-CH₃) груп, які не забезпечують достатньої міжфазної взаємодії із субстратом. Найбільш придатним є ПП з масою 20 000 г/моль (адгезія 3,9 МПа), тоді як збільшення маси до 80 000 г/моль призводить до критичного зниження розтікання (0,2 мм) та адгезії (0,8 МПа).

Нейлонові плівкоутворювачі. Нейлон відрізняється досить високим значенням поверхневого натягу, що обмежує розтікання адгезиву. Однак наявність у його ланцозі високополярних груп (-NH-) та (C=O) сприяє іонній взаємодії з металевими поверхнями шляхом утворення координаційних комплексів, що нівелює негативні реологічні властивості. Ефективність нейлону зростає при зменшенні молекулярної маси: найкращі показники (адгезія 6,1 МПа, ударна міцність 1,3 Нм) отримано при 20 000 г/моль.

Насичені полієфіри (НП). Використання насичених полієфірів є високоефективним завдяки наявності полярної естерної функціональної групи (-C(=O)-O-), яка бере участь у міжфазній взаємодії з поверхнею металу. Оптимальною є молекулярна маса на рівні 30 000 г/моль (поверхневий натяг 31,5 мДж/м², розтікання 6,8 мм, адгезія 8,4 МПа, ударна міцність 1,9 Нм). Зменшення маси до 10 000...20 000 г/моль призводить до надмірного розтікання (8,2...10,2 мм) і утворення напливів, тоді як збільшення до 50 000...60 000 г/моль формує крихке покриття (адгезія 4,1...4,9 МПа) та ускладнює технологічний процес подрібнення порошку.

Висновки. На основі проведених комплексних досліджень встановлено, що використання порошкових термопластичних систем є високоефективним методом вторинного захисту залізобетонних конструкцій. На відміну від традиційних лакофарбових матеріалів на розчинниках, ці системи забезпечують створення суцільного, безпористого бар'єра, що критично важливо для бетону через його капілярно-пористу структуру.

Доведено, що ключовим фактором, який визначає придатність полімерної системи для захисту залізобетону, є баланс між молекулярною масою плівкоутворювача та його реологічними властивостями. Встановлено, що для забезпечення надійної адгезії (понад 8-9 МПа) необхідно використовувати полімери з помірною молекулярною масою (наприклад, ПВДФ – 40 000 г/моль, ПВХ – 20 000 г/моль), оскільки подальше зростання довжини ланцюга призводить до дефіциту розтікання та утворення прихованих дефектів на межі фаз «полімер-бетон».

Підтверджено, що системи на основі полівініліденфториду (ПВДФ) та насичених полієфірів (НП) є найбільш перспективними для захисту конструкцій, що експлуатуються в особливо агресивних середовищах. Завдяки високій енергії хімічних зв'язків та низькому поверхневому натягу розплаву,

ці покриття не лише демонструють високу адгезію (до 9,1 МПа), але й забезпечують хімічну стійкість та водонепроникність, що фактично зупиняє процеси карбонізації бетону та хлоридної корозії арматури.

Впровадження розроблених складів порошкових покриттів дозволяє реалізувати концепцію «ресурсоекономності» у будівництві: по-перше, через відсутність токсичних викидів розчинників (екологічний аспект), а по-друге, через значне подовження міжремонтних термінів експлуатації будівель та споруд (економічний аспект).

1. Бабич Є. П., Житковський В. В., Кочкар'ов Д. В. Довговічність залізобетонних конструкцій в агресивному середовищі. Рівне: НУВГП, 2021. 245 с.

Babych Ye. P., Zhytkovskyi V. V., Kochkarov D. V. Dovhovichnist zalizobetonnykh konstruktssii v ahresyvnomu seredovyschii. Rivne: NUVHP, 2021. 245 s.

2. Про забезпечення хімічної безпеки та управління продукцією: Закон України від 01.12.2022 № 2804-IX. Відомості Верховної Ради України. 2023. № 45.

Pro zabezpechennia khimichnoi bezpeky ta upravlinnia produktsiieiu: Zakon Ukrainy vid 01.12.2022 № 2804-IX. Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy. 2023. № 45.

3. Кривенко П. В., Пушкар'ова К. К., Барановський В. Б. та ін. Будівельне матеріалознавство: Підручник. Київ: ТОВ УВПК «ЕксОб», 2004. 455 с.

Kryvenko P. V., Pushkarova K. K., Baranovskyi V. B. ta in. Budivelne materialoznavstvo: Pidruchnyk. Kyiv: TOV UVPK «EksOb», 2004. 455 s.

4. Mc Cafferty, E. Introduction to Corrosion Science / E. Mc Cafferty. – Springer, 2010. – 583 p.

5. Basheer P. A. M., Gunning P. J., Nanukuttan S. V. Non-destructive evaluation of concrete surface treatments. Materials and Structures. 2022. Vol. 55. № 4. P. 89-104.

6. Lastivka O. Effectiveness of corrosion protection of reinforced concrete with thermoplastic powder coatings. Transfer of Innovative Technologies. 2024. 7(1), P.34–40. ISSN 2617-0264.

7. Gots V., Kochetov G., Lastivka O., Samchenko D., Mehet V. Corrosion resistance of powder coating with use of ferritization waste. Building materials and techniques. 2023. Vol. 4. P. 49–55.

8. Ducker W. A. Surface tension and spreading of polymer melts on porous substrates. Polymer Science Series A. 2023. Vol. 65. № 3. P. 310-318.

9. Gots V. I., Lastivka O. V., Tomin O. O., Mehet V. S. Formation of powder coating properties in the system "filmforming – cross-linking agent". Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2022. № 87. С. 57–64.

10. Schmidt W., Miller R. High-performance PVDF coatings for architectural applications. Progress in Organic Coatings. 2024. Vol. 178. 107450.

Відомості про статтю:		Article information	
Отримано	16.03.2026	Received	16.03.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді	20.03.2026	Received in revised form	20.03.2026
Прийнято	15.04.2026	Accepted	15.04.2026
Опубліковано	31.05.2026	Published	31.05.2026

Політика відкритого доступу

Політика відкритого доступу збірника передбачає безкоштовний та безперешкодний доступ до наукових матеріалів. Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Open access policy

The open access policy of the collection provides free and unhindered access to scientific materials. All data is available in digital or graphical form in the main text of the article.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest regarding the current study, including financial, personal, authorial or any other that could be included in the study, as well as the results presented in this document.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

Use of Artificial Intelligence

The authors confirm that they did not use artificial intelligence technologies in the creation of the current work.