

УДК: 678.5

DOI: 10.20535/iwccmm2025326847

ОЦІНКА УФ-СТІЙКОСТІ ПЛІВОК НА ОСНОВІ ПЛА З ВИКОРИСТАННЯМ НАТУРАЛЬНИХ ПЛАСТИФІКАТОРІВ

Ангеліна ЛЕБЕДЕНКО,

Студент

КПІ ім. Ігоря Сікорського,

lebedenko.angelina@lil.kpi.ua

Дарина НАЙДОВА,

Студент

КПІ ім. Ігоря Сікорського,

naidova.darina@lil.kpi.ua

Анна БІЛОУСОВА,

Аспірант

КПІ ім. Ігоря Сікорського,

naidova.darina@lil.kpi.ua

Анотація У роботі досліджено вплив біорозкладних пластифікаторів — натурального та соєвого восків — на стабільність полілактидної (PLA) плівки під дією ультрафіолетового випромінювання. Об'єктом дослідження є біополімерні плівки на основі PLA, предметом — модифікація їх властивостей за допомогою натуральних пластифікаторів. Метою є оцінка ефективності таких добавок з позицій покращення експлуатаційних характеристик без втрати екологічної переваги матеріалу. Встановлено, що обидва типи восків покращують гідрофобність плівки після УФ-старіння порівняно з чистим PLA та зразками, модифікованими PEG. Найменше зниження кута змочування спостерігалось для зразків із натуральним воском. Висновки свідчать про доцільність використання біопластифікаторів для підвищення УФ-стабільності PLA-плівок без зниження їх біорозкладності, що відкриває перспективи їхнього застосування у сфері екологічної упаковки.

Ключові слова: PLA, пластифікатори, соєвий віск, натуральний віск, УФ-випромінювання, біополімери

Полілактид (PLA) — це перспективний біорозкладний полімер, який отримують із відновлюваних джерел, зокрема кукурудзяного крохмалю або цукрової тростини. Завдяки своїй здатності до біорозкладання він вважається більш екологічно стійким, ніж традиційні пластики, виготовлені на основі нафти. Після використання, PLA за відповідних промислових умов компостування розкладається на вуглекислий газ, воду та біомасу, що сприяє зменшенню кількості пластикових відходів і зниженню рівня забруднення довкілля [1, 2].

Попри свої екологічні переваги, PLA має певні експлуатаційні обмеження — зокрема, він є крихким матеріалом, що ускладнює його застосування в деяких сферах. Проте ці властивості можна коригувати: додавання пластифікаторів дозволяє суттєво підвищити гнучкість і міцність полімеру. Це пояснюється тим, що пластифікатори зменшують міжмолекулярні взаємодії в структурі PLA, забезпечуючи більшу рухливість полімерних ланцюгів і, як наслідок, покращену пластичність матеріалу [3].

З огляду на екологічну спрямованість PLA, важливою задачею сучасних досліджень є пошук пластифікаторів, які б не тільки покращували механічні властивості полімеру, але й відповідали принципам сталого розвитку. У цьому контексті особливу увагу привертають біопластифікатори — добавки на основі природних або біорозкладних речовин, які можуть забезпечити сумісність з PLA без шкоди для його екологічної переваги. Вивчення їхньої ефективності, а також впливу на стабільність та здатність до розкладання полімерної плівки, зокрема під дією ультрафіолетового випромінювання, є актуальним напрямом досліджень.

Ультрафіолетове випромінювання здатне викликати фотостаріння полімерів, що призводить до зменшення їхнього терміну експлуатації, а також до змін у механічних, оптичних і бар'єрних властивостях матеріалу [4, 5]. Це особливо актуально для плівок на основі PLA, які використовуються в харчовій упаковці, адже для них важливо не лише зберегти екологічні переваги, а й забезпечити належний рівень міцності для ефективного захисту продуктів. Водночас надмірна стійкість до УФ-випромінювання також є небажаною, оскільки вона може сповільнити процес природного розкладання, що суперечить принципам екологічності матеріалу [4].

У дослідженні були використані два типи біорозкладних пластифікаторів — натуральний віск та соєвий віск, які демонструють хорошу сумісність із PLA. Вибір між ними залежить від бажаних властивостей кінцевого матеріалу. Натуральний віск, завдяки своїй вищій температурі плавлення, забезпечує підвищену жорсткість і міцність, що робить його придатним для використання

в умовах змінних температур. Натомість соєвий віск характеризується нижчою температурою плавлення, завдяки чому надає плівкам більшої гнучкості та еластичності [3]. Для оцінки ефективності цих біопластифікаторів усі зразки порівнювали з еталонними, отриманими з використанням поліетиленгліколю (PEG) — поширеного пластифікатора, який забезпечує передбачувану поведінку плівок у стандартних умовах.

В ході дослідження було використано розчин PLA 15% з додаванням до нього розчинів натурального та соєвого восків в різних розчинниках, таких як дихлорметан та етилацетат. Плівки виготовлені на основі етилацетату мали меншу швидкість застигання, а також значно більшу адгезію. Далі в дослідженні етилацетат, як розчинник, не використовувався. На відміну від етилацетату, дихлорметан показав кращі властивості при висиханні плівки та меншу адгезію. Для виготовлення зразків плівок було використано аплікатор та предметне скло, товщина вологої плівки складала 200 нм.

До складу зразків (Рис. 1) було додано целюлозу марки TECHNOCEL 500, як наповнювач. В якості пластифікаторів використовували натуральний віск (3% відносно полімеру), соєвий віск (3% відносно полімеру), та PEG (3% відносно полімеру).

Готові зразки були випробувані на стійкість до ультрафіолетового випромінювання за допомогою УФ-лампи потужністю 250 Вт, з інтенсивністю випромінювання на 340 нм (UVA 340) 0,7 Вт/м². Зразки були розміщені на підкладці для поліпшення відведення тепла, а відстань між УФ-лампю та поверхнею зразка складала 50 см. Для оцінки впливу ультрафіолетового випромінювання було застосовано метод сидячої краплі. Після різних періодів експозиції ультрафіолету, на зразок наносили по п'ять крапель води, після чого обчислювали середнє значення кута змочування. Статичний кут змочування вимірювали, використовуючи цифрову камеру UCMOS 1300 (Sigeta) та програму TopView. Для порівняння з літературними даними, отримані результати були переведені в еквівалент часу, де 1 рік впливу ультрафіолету

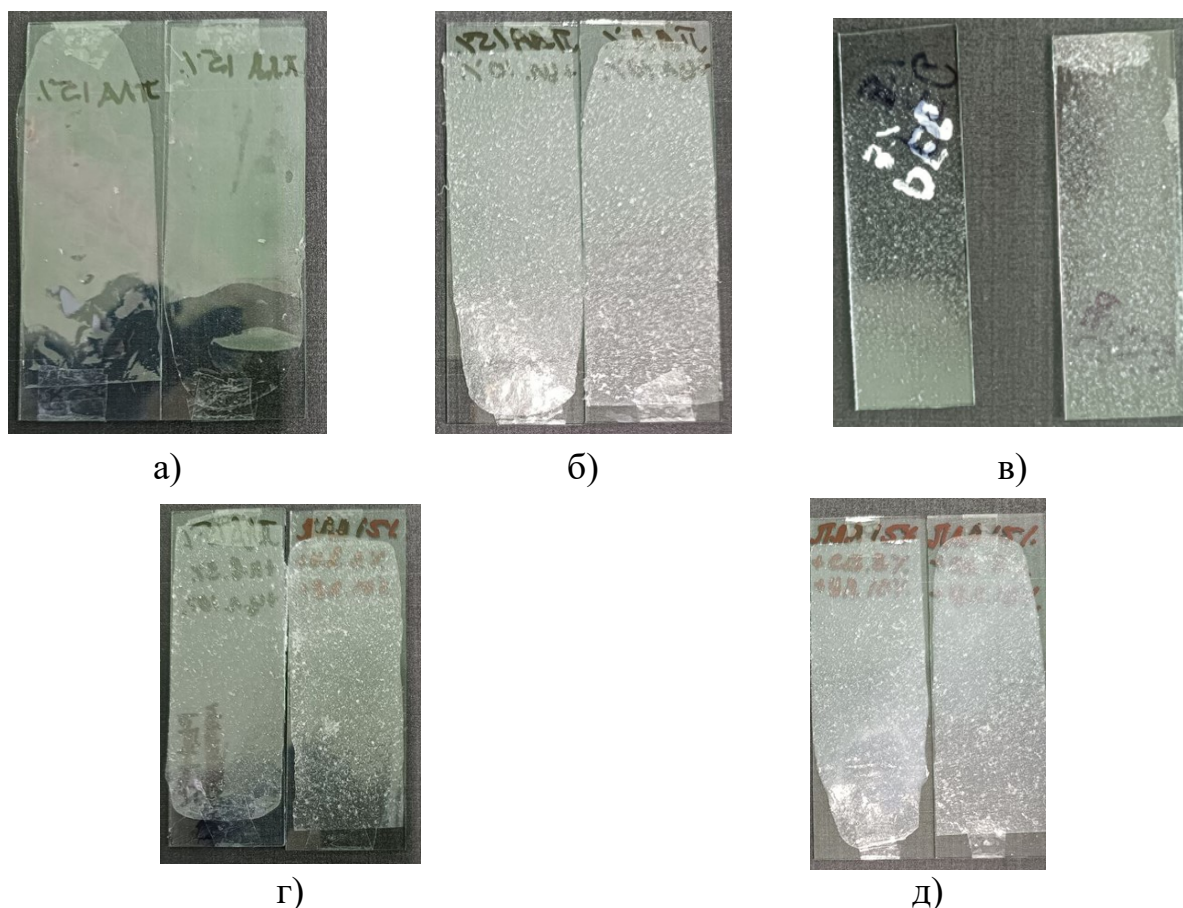


Рис. 1. Зразки плівок на основі 15% розчину ПЛА з різними добавками: а) чистий зразок ПЛА; б) ПЛА + 10% целюлози; в) ПЛА + 10% целюлози + 3% ПЕГ; г) ПЛА + 10% целюлози + 3% натурального воску; д) ПЛА + 10% целюлози + 3% соєвого воску

відповідає 140 годинам опромінення. Результати випробувань наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати вимірювання кутів змочування після УФ-опромінення

Час, хв	Час, дні	ПЛА 15% чистий	ПЛА + Цл 10%	ПЛА + Цл 10% + НВ 3%	ПЛА + Цл 10% + СВ 3%	ПЛА + Цл 10% + ПЕГ 3%
0	0	73	74	73	74	74
5	13	73	73	73	74	74
10	26	73	73	72	74	74
15	39	71	71	69	73	71
20	52	71	70	68	71	69
25	65	70	68	67	70	68
30	78	69	67	66	70	67
40	104	68	65	66	66	65
50	130	67	64	64	66	64
90	235	51	58	65	64	57
120	313	47	51	61	58	53

На основі отриманих даних було побудовано графік залежності кута змочування від тривалості УФ-опромінення (Рис. 1).

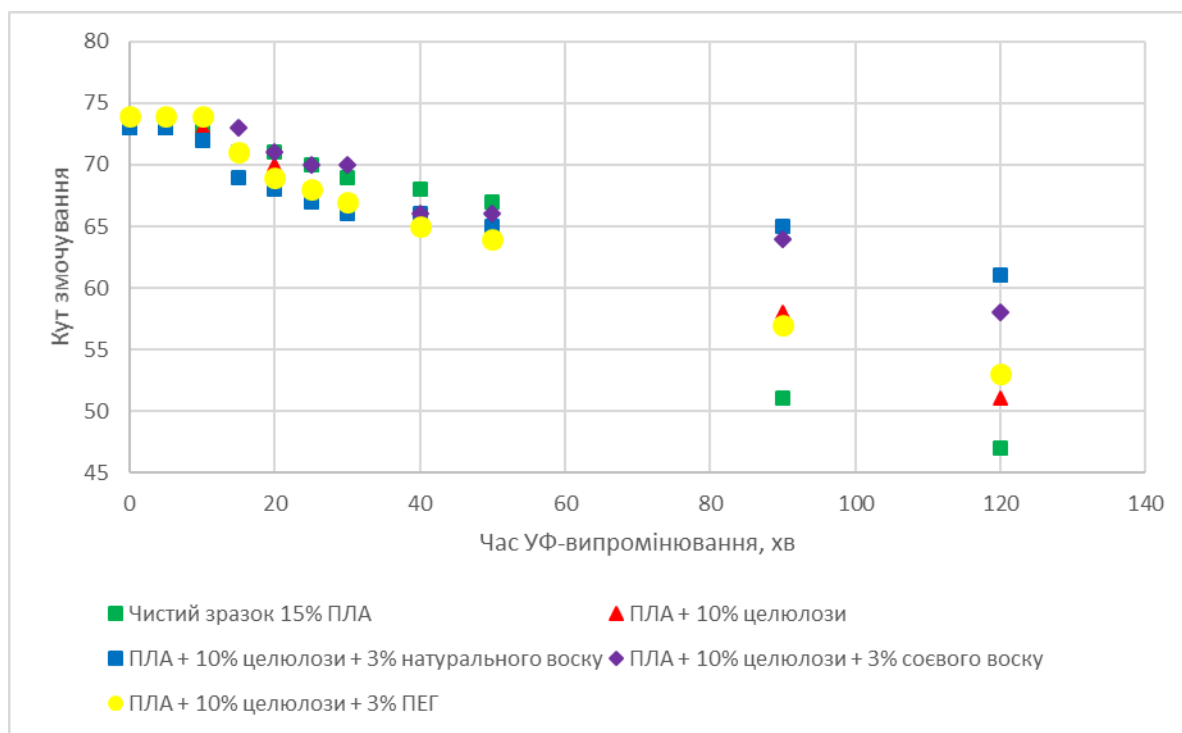


Рис. 2. Залежність кута змочування від тривалості УФ-опромінення

Під час проведених випробувань на вплив ультрафіолетового випромінювання (УФ) всі зразки на основі PLA продемонстрували зниження кута контакту з водою, хоча розклад матеріалу відрізнявся в залежності від пластифікатора. Найбільше зниження кута змочування зафіксовано для чистого ПЛА. Додавання 10% целюлози дещо покращило стабільність матеріалу (51°), а введення 3% поліетиленгліколю (ПЕГ) дозволило знизити розклад зразків ще більше — до 53° . Зразки з додаванням натурального та соєвого восків продемонстрували найменше зменшення гідрофобності: 61° і 58° відповідно.

Усі зразки проявили ознаки деструкції, зокрема лущення поверхні при механічному контакті, вже після 40 хвилин УФ-опромінення, що відповідає приблизно 104 дням природного старіння. Отримані результати узгоджуються з даними, наведеними в літературі [6].

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження було досягнуто поставлену мету — оцінено вплив біорозкладних пластифікаторів натурального та соєвого восків на стабільність плівок на основі полілактиду (PLA) під дією ультрафіолетового випромінювання. Результати вимірювання кута змочування свідчать, що композиції з додаванням восків демонструють вищу УФ-стійкість порівняно як із чистим ПЛА, так і зі зразками, що містять поліетиленгліколь (ПЕГ). Після 120 хв опромінення зразки з натуральним і соєвим воском зберігали вищі значення кута змочування — 61° і 58° відповідно, тоді як зразок із ПЕГ мав 53° , а контрольний — лише 47° . Таким чином, використання біопластифікаторів на основі восків підвищує довговічність полімерних матеріалів без втрати їх екологічності.

Список літератури:

1. Jacobson, J., Keif, M., Rong, X., Singh, J., & Vorst, K. (n.d.). Flexography printing performance of PLA film. *Industrial Technology and Packaging*. https://digitalcommons.calpoly.edu/it_fac/37
2. Malek, N. S. A., Faizuwan, M., Khusaimi, Z., Bonnia, N. N., Rusop, M., & Asli, N. A. (2021). Preparation and Characterization of Biodegradable Polylactic Acid (PLA) film for food packaging application: a review. *Journal of Physics Conference Series*, 1892(1), 012037. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1892/1/012037>
3. Chen, C., Wang, L., Es-Haghi, S. S., Tajvidi, M., Wang, J., & Gardner, D. J. (2024). Biodegradable and recyclable bio-based laminated films of poly (lactic acid) and cellulose nanocrystals for food barrier packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 42, 101244. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2024.101244>
4. Podzorova, M. V., Tertyshnaya, Y. V., Pantyukhov, P. V., Popov, A. A., & Nikolaeva, S. G. (2017). Influence of ultraviolet on polylactide degradation. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/1.5013854>
5. Ludwiczak, J., Dmitruk, A., Skwarski, M., Kaczyński, P., & Makula, P. (2023). UV resistance and biodegradation of PLA-based polymeric blends doped with PBS, PBAT, TPS. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 28(4), 366–382. <https://doi.org/10.1080/1023666x.2023.2218696>
6. Hamdan, M. N., Naim, A. M. M., Rozi, N. S. M., Sajab, M. S., & Kaco, H. (2024). Intensify Biodegradation Process of Polylactic Acid (PLA) Waste Generated from 3D Printing Activities. *Materials Science Forum*, 1114, 137–144. <https://doi.org/10.4028/p-m2eeip>

Список літератури:

1. Jacobson, J., Keif, M., Rong, X., Singh, J., & Vorst, K. (n.d.). Flexography printing performance of PLA film. *Industrial Technology and Packaging*. https://digitalcommons.calpoly.edu/it_fac/37
2. Malek, N. S. A., Faizuwan, M., Khusaimi, Z., Bonnia, N. N., Rusop, M., & Asli, N. A. (2021). Preparation and Characterization of Biodegradable Polylactic Acid (PLA) film for

- food packaging application: a review. *Journal of Physics Conference Series*, 1892(1), 012037. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1892/1/012037>
3. Chen, C., Wang, L., Es-Haghi, S. S., Tajvidi, M., Wang, J., & Gardner, D. J. (2024). Biodegradable and recyclable bio-based laminated films of poly (lactic acid) and cellulose nanocrystals for food barrier packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 42, 101244. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2024.101244>
 4. Podzorova, M. V., Tertyshnaya, Y. V., Pantyukhov, P. V., Popov, A. A., & Nikolaeva, S. G. (2017). Influence of ultraviolet on polylactide degradation. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/1.5013854>
 5. Ludwiczak, J., Dmitruk, A., Skwarski, M., Kaczyński, P., & Makuła, P. (2023). UV resistance and biodegradation of PLA-based polymeric blends doped with PBS, PBAT, TPS. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 28(4), 366–382. <https://doi.org/10.1080/1023666x.2023.2218696>
 6. Hamdan, M. N., Naim, A. M. M., Rozi, N. S. M., Sajab, M. S., & Kaco, H. (2024). Intensify Biodegradation Process of Polylactic Acid (PLA) Waste Generated from 3D Printing Activities. *Materials Science Forum*, 1114, 137–144. <https://doi.org/10.4028/p-m2eeip>

EVALUATION OF THE UV RESISTANCE OF PLA-BASED FILMS USING NATURAL PLASTICIZERS

Angelina LEBEDENKO

Student,

Daryna NAIDOVA

Student,

Anna BILOUSOVA

PhD student

Igor Sikorsky Kyiv Politechnic Institute

Abstract The paper investigates the effect of biodegradable plasticizers - natural and soybean waxes - on the stability of polylactide (PLA) films under the influence of ultraviolet radiation. The object of the study is biopolymer films based on PLA, and the subject is the modification of their properties using natural plasticizers. The aim is to evaluate the effectiveness of such additives in terms of improving performance characteristics without losing the environmental benefits of the material. It was found that both types of waxes improve the hydrophobicity of the film after UV aging compared to pure PLA and samples modified with PEG. The smallest decrease in the contact angle was observed for samples with natural wax. The conclusions indicate the feasibility of using bioplastifiers to increase the UV stability of PLA films without reducing their biodegradability, which opens up the prospects for their use in the field of eco-friendly packaging.

Key words: PLA, plasticizers, soy wax, natural wax, UV radiation, biopolymers