

Б. І. Куліш, Д. С. Катрук, А. С. Масюк, Б. В. Левицький, Ю. Ю. Цюпка

Національний університет "Львівська політехніка",

кафедра хімічної технології переробки пластмас

andrii.s.masiuk@lpnu.ua

ВПЛИВ МОРФОЛОГІЇ НА БІОДЕГРАДАБЕЛЬНІСТЬ ПЛАСТИФІКОВАНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

<https://doi.org/10.23939/ctas2025.01.191>

Досліджено вплив модифікаторів різної природи на біодеградабельність полілактидних матеріалів. Встановлено, що введення крохмалю та епоксидованої соєвої олії в полілактиду матрицю прискорює біодеградацію полімерного композиту. Виявлено вплив крохмалю та епоксидованої соєвої оливи на характер міжмолекулярних взаємодій між компонентами системи. На підставі рентгеноструктурного аналізу та скануючої електронної мікроскопії виявлено, що збільшення вмісту епоксидованої соєвої оливи та крохмалю в матриці полілактиду знижує кристалічність і покращує аморфні характеристики матеріалу, а також сприяє формуванню матеріалів з більш складною морфологією.

Ключові слова: полілактид, крохмаль, епоксидована соєва олива, біодеградабельність, полімерний композит.

Вступ

Сьогодні компостування є одним із найперспективніших методів переробки полімерів для зменшення екологічного впливу пластикових відходів на довкілля [1]. Деградація в аеробних умовах, що відбувається під час компостування, є важливою характеристикою для полімерних матеріалів. Компостування передбачає складну взаємодію між полімером і різноманітними живими організмами, включаючи мікрофлору, фауну ґрунту (дрібних комах, дощових хробаків) та макроорганізми. Основними групами мікроорганізмів, що беруть участь у цьому процесі, є термофільні та мезофільні гриби, бактерії та актиноміцети, для яких органічні речовини є джерелом поживи. Процес потребує вуглецю, кисню, азоту, води та тепла, з ідеальним співвідношенням вуглецю до азоту 30:1 для оптимального росту термофільних мікроорганізмів [2, 3].

Компостування проходить два етапи: активне компостування та затвердіння. На першому етапі температура підвищується до понад 60 °C, що спричиняє високу мікробну активність, але також може призвести до загибелі або латентного стану деяких мікроорганізмів. Потім температура стабілізується або знижується, і на етапі затвердіння процес компостування триває повільніше, оскільки зменшується

споживання кисню, а компост можна залишати без перевертання. Процес завершується, коли мікроорганізми споживають залишки поживних речовин і майже весь вуглець перетворюється на вуглекислий газ [4].

Біодеградабельні полімери, такі як полілактид, полібутиленадипат-ко-терефталат та полігидроксикапроат, розкладаються під дією мікроорганізмів у відповідних умовах [5–7]. Полілактид (ПЛА) відомий своєю відносною стійкістю до біодеградації мікроорганізмами. Деякі актиноміцети, такі як *Bacillus licheniformis*, *Bacillus brevis*, *Micromonospora viridifaciens*, і *Thermoactinomyces vulgaris*, здатні розкладати ПЛА, але лише після попереднього абіотичного гідролізу, який вивільняє олігомери або продукти з низькою молекулярною масою, доступні для асиміляції мікроорганізмами [8].

Гідролітична деградація полімолочної кислоти є важливим аспектом для відповідності промисловості пластмас сучасним екологічним нормам та медичним застосуванням. Гідроліз ПЛА може відбуватися як на поверхні, так і в об'ємі, і залежить від різних факторів, включаючи хімічний склад, стереохімію, молекулярну масу, морфологію зразка, орієнтацію ланцюга, наявність залишкових мономерів та екологічні умови [9].

Більшість досліджень деградації ПЛА пов'язані з абіотичним гідролізом. Виявили, що неконтрольована гідролітична деградація матриці ПЛА часто обмежує її застосування. Встановлено, що гідролітична деградація ПЛА відбувається в основному в об'ємі матеріалу, а не на поверхні, і загально визнано, що деградація слідує за автокаталітичним гідролізом.

Утворення олігомерів молочної кислоти після розриву ланцюга збільшує концентрацію кінцевих груп кислоти в середовищі деградації, роблячи гідролітичну деградацію ПЛА самокаталізованим і самопідтримуючим процесом завдяки каталітичній дії цих кінцевих груп. Водночас структурно-морфологічна організація ПЛА значно впливає на механізм її гідролітичної деградації. Було встановлено, що розщеплення гідролітичного ланцюга відбувається переважно в аморфних областях, що призводить до підвищення кристалічності полімеру [10, 11]. На швидкість реакції розкладання також впливає структура макромолекул, форма зразка, вміст та тип наповнювача і модифікатора, а також умови, за яких виконується гідроліз, включаючи рН і температуру [12].

Метою роботи є дослідження впливу морфології на біодеградабельність полілактидних матеріалів.

Матеріали і методи досліджень

Для досліджень використовували полілактид марки Ingeo 2500 HP (виробництва NatureWorks LLC, США). Для наповнення і модифікування полілактиду використовували нативний картопляний крохмаль вищого сорту (ПБП "ВИМАЛ", Україна); епоксидовану соєву оливу (AKESBO, Туреччина) та дрібнодисперсний кальцію карбонат (ч.д.а).

Тверді компоненти висушували за 70 °С впродовж 4 год, використовуючи вакуум-сушарку типу СВ-30. Полілактидні композити одержували змішуванням дрібнодисперсних компонентів у змішувачі барабанного типу протягом 10–15 хв. Перед змішуванням до полілактиду додавали епоксидовану соєву оливу. Потім суміш гомогенізували завдяки перемішуванню у в'язкотекучому стані на лабораторному екструдері Cellier зі шнеком завдовжки 700 мм і діаметром 25 мм, із подальшим витисканням та охолодженням матеріалу у вигляді стрічки.

Для дослідження біодеградабельності полілактидних композитів зразки розміром 2 см × 2 см × 0,3 см закопували у ґрунт з рН~7, що відповідає типовим ґрунтовим умовам для проведення подібних досліджень. Після закопування композити піддавали природним умовам ґрунту, і кожен місяць визначали їхню втрату маси. Для цього зразки виймали з ґрунту, ретельно очищували від налиплого ґрунту за допомогою дистильованої води, висушували в сушильній шафі при температурі 40 °С протягом ночі (12 годин) і зважували з використанням лабораторних ваг із точністю до 0,001 г.

Для характеристики фізичних і хімічних взаємодій в полілактидних використовували ІЧ-спектроскопічний аналіз на спектрофотометрі "Spectrum Two (PerkinElmer, UK)" з діамантовою приставкою порушеного повного внутрішнього відбиття UATR. Спектральна роздільна здатність становила 0,4 см⁻¹; діапазон сканування – від 4000 до 400 см⁻¹; кількість сканувань – 32. Інтерпретацію отриманих результатів виконували з допомогою перетворення Фур'є.

Рентгеноструктурне дослідження проводили на рентгенівському дифрактометрі AERIS Research (Malvern PANalytical), який додатково оснащений:

- приставкою для дослідження зразків за температури до 500 °С в атмосфері повітря;
- приставкою для аналізу тонких плівок;
- програмним забезпеченням HighScore Plus для якісного та кількісного аналізу з можливістю уточнень за методом Рітвельда, проведення аналізу тонких плівок.

Сканувальну електронну мікроскопію одержаних матеріалів проводили на растровому мікроскопі електронного мікроаналізатора РЕММА-102-02, використовуючи зразки з мідним напиленням. Сканування поверхні зразка здійснювали за допомогою електронного пучка діаметром кілька нанометрів і з енергією електронів 0,2–40 кВ. Діапазон зміни крат збільшення 10–300000, роздільна здатність становить близько 5,0 нм.

Результати досліджень та їх обговорення

Полілактид є одним із найпоширеніших біополімерів, який застосовують у виробництві пакувальних матеріалів, біомедичних виробів та 3D-друку. Однак його біодеградабельність залежить

від багатьох факторів, зокрема, кристалічності та компонентного складу (наприклад, вмісту модифікаторів, наповнювачів, пластифікаторів), температури та вологості середовища, наявності мікроорганізмів тощо [13–15]. Саме тому було про-

ведено дослідження, спрямовані на оцінювання впливу наповнювачів на біодеградабельність полімерних композитів.

Результати досліджень біодеградабельності полімерних композитів наведено на рис. 1.

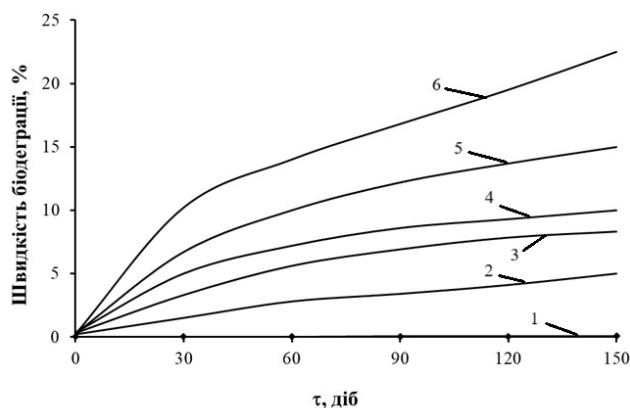


Рис. 1. Зміна швидкості деградації зразків з часом у ґрунті. Склад композиції, % мас.:

- 1 – ПЛА:крохмаль:ЕСО = 100:0:0;
- 2 – ПЛА:крохмаль:ЕСО = 100:5:0;
- 3 – ПЛА:крохмаль:ЕСО = 100:5:5;
- 4 – ПЛА:крохмаль:ЕСО = 100:5:10;
- 5 – ПЛА:крохмаль:ЕСО = 100:5:15;
- 6 – ПЛА:крохмаль:ЕСО = 100:5:20

Виявлено, введення модифікаторів, таких як крохмаль та епоксидована соєва олія в полілактиду матрицю, покращує проникність матеріалу, тим самим прискорюючи біодеградацію. Дослідження показали, що чистий ПЛА не піддається значній деградації протягом п'яти місяців, тоді як додавання 5 % крохмалю збільшує швидкість розкладання до 2 %. З подальшим збільшенням вмісту епоксидованої соєвої олії швидкість біодеградації зростає до 17,35 %. Це, очевидно, пов'язано з вивільненням ЕСО з полімерної матриці, який є низькомолекулярним пластифікатором [16]. Вільний об'єм, створений пластифікатором у матриці суміші, сприяє проникненню вологи глибше в матрицю ПЛА, прискорюючи гідроліз ланцюга ПЛА.

Динаміка зміни швидкості гідролітичної деградації ПЛА та його композитів із різним вмістом модифікаторів наведено на рис. 2.

Композити з крохмалем демонструють більш виражене зниження маси вже на ранніх етапах експерименту. Наприклад, зразок з 5 % вмістом крохмалю втрачає близько 20 % маси

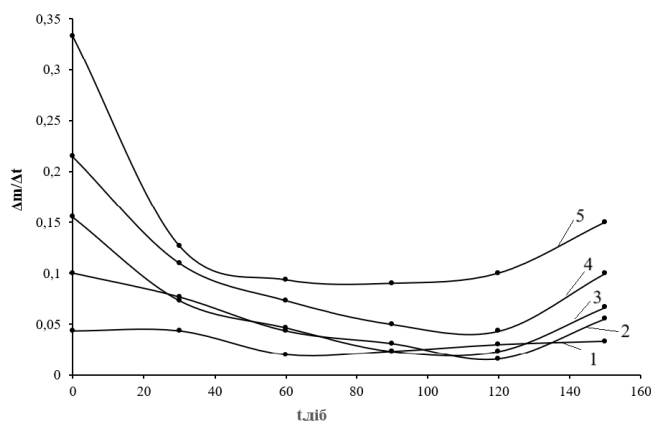


Рис. 2. Відносна швидкість біодеградації зразків

Склад композиції, % мас.:

- 1 – ПЛА:крохмаль:
ЕСО = 100:5:0;
- 2 – ПЛА:крохмаль:ЕСО = 100:5:5;
- 3 – ПЛА:крохмаль:ЕСО = 100:5:10;
- 4 – ПЛА:крохмаль:ЕСО = 100:5:15;
- 5 – ПЛА:крохмаль:ЕСО = 100:5:20

впродовж перших 30 днів, тоді як чистий ПЛА упродовж цього ж періоду демонструє втрату маси лише близько 5 %. Це свідчить про значне прискорення гідролітичної деградації за наявності крохмалю.

Композити з епоксидованою соєвою олією хоча і відзначаються більш повільною деградацією порівняно з композитами з крохмалем, однак також виявляють помітне зниження маси з часом. Зокрема, зразок з 10 % вмістом епоксидованої соєвої оливи втрачає близько 8 % маси впродовж 30 днів. Встановлено, що тип модифікатора суттєво впливає на механізм і швидкість деградації. Крохмаль, завдяки своїй гігроскопічності, створює додаткові канали для проникнення води в полімерну матрицю, що призводить до більш інтенсивного розриву естерних зв'язків. Епоксидована соєва олія, діючи як пластифікатор, підвищує рухливість макромолекул полімеру та сприяє більш рівномірному розподілу напружень, що сприяє деградації.

Аналіз кінцевих ділянок кривих свідчить про поступове уповільнення процесу деградації

для всіх композитів. Це пов'язано зі зменшенням кількості доступних для гідролізу естерних зв'язків та утворенням більш стійких продуктів деградації. Однак, навіть після тривалого періоду експерименту, композити з модифікаторами продовжують демонструвати більш високу швидкість деградації порівняно з чистим ПЛА. Встановлено, що введення крохмалю і епоксидованої соєвої олії суттєво прискорює процес деградації ПЛА, причому суттєвіший вплив ЕСО, ймовірно, пов'язаний із підвищенням рухливості макромолекул і збільшенням доступності естерних зв'язків для гідролізу.

Отримані експериментальні дані добре корелюють з теоретичними моделями деградації полімерів, які передбачають, що швидкість деградації залежить від таких факторів, як молекулярна маса полімеру, його морфологія, а також природа та концентрація модифікаторів.

У зв'язку з цим доцільним є дослідження впливу морфології і кристалічної структури полілактидних композитів.

Для встановлення можливих змін у надмолекулярній структурі полілактиду, а також встановлення характеру міжмолекулярних взаємодій між функційними групами компонентів системи були проведені ІЧ спектроскопічні дослідження (рис. 3).

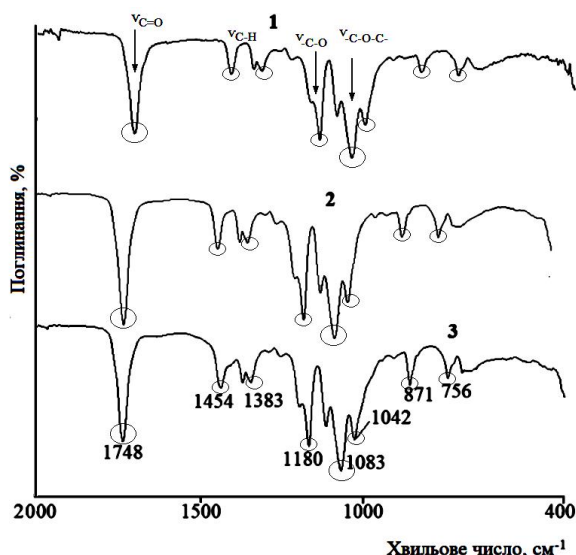


Рис. 3. ІЧ спектри полілактиду та композитів на його основі. Вміст крохмалю, % мас: 1 – 0; 2 – 10; 3 – 20

Для полілактиду, незалежно від природи його додатків і ступеня кристалічності, характерні смуги поглинання в області 1000–1200 cm^{-1} з най-

більшою інтенсивністю, що зумовлені валентними симетричними й антисиметричними коливаннями етерної групи $-\text{C}-\text{O}-\text{C}-$. Для всіх зразків також відзначено смуги поглинання, що відповідають валентним симетричним і антисиметричним коливанням зв'язку $\text{C}-\text{H}$ метиленової групи в області 1340–1400 cm^{-1} і 1440–1470 cm^{-1} . Інтенсивна смуга поглинання, яка спостерігається в області 1730–1780 cm^{-1} , може бути віднесена до валентних коливань карбонільної групи $\text{C}=\text{O}$ в полілактиді.

Інтенсивні смуги для композитів з крохмалем в межах 1200–700 cm^{-1} , очевидно, пов'язані з валентними коливаннями груп $\text{C}-\text{OH}$ і з етерними зв'язками $\text{C}-\text{O}-\text{C}$, які є всередині кожного глюкопіранозного кільця, та етерний зв'язок, що з'єднує сусідні кільця. Варто зазначити, що в даній області, окрім валентних коливань $\text{C}-\text{O}$, $\text{C}-\text{C}$ зв'язків, характерні деформаційні коливань $-\text{CH}_2$ та $-\text{CH}_3$ груп. При цьому прояв усіх типів поглинання гідроксильної групи залежить від того, до якого атома вуглецю елементарної ланки крохмалю приєднана гідроксильна група, чи є ця група "вільною" або пов'язаною внутрішньомолекулярними або міжмолекулярними водневими зв'язками [17].

Для наповнених крохмалем та модифікованих ЕСО полілактидних матеріалів спостерігається незначна зміна інтенсивності характеристичних смуг, деякі з них зміщені порівняно з вихідним полілактидом, що, на нашу думку, свідчить про наявність у системі міжмолекулярних взаємодій, зокрема, водневих зв'язків та проходження часткової кристалізації полілактиду під впливом компонентів системи. Зазначено, що введення в систему дисперсного карбонату кальцію в цілому не впливає на характер спектроскопічних кривих полілактиду [18].

Для вивчення кристалічної структури та кількісного визначення ступеня кристалічності полілактидних композитів використовували рентгеноструктурний аналіз. Дифрактограми крохмаль-полілактидних композитів зображені на рис. 4.

Дифрактограма чистого ПЛА характеризується чіткими кристалічними піками, при $2\theta = 17-18^\circ$, що відповідають площинам 200/110 типового орторомбічного кристалу. Ці піки вказують на напівкристалічну природу ПЛА, з його впорядкованими полімерними ланцюгами, що утворюють області кристалічності всередині аморфної матриці.

Різкість і інтенсивність цих піків відображають ступінь кристалічності матеріалу, що безпосередньо впливає на його механічні властивості, такі

як жорсткість і міцність. Наявність широких областей між піками також свідчить про певний рівень аморфного вмісту в структурі ПЛА, що сприяє її загальній гнучкості та пластичності.

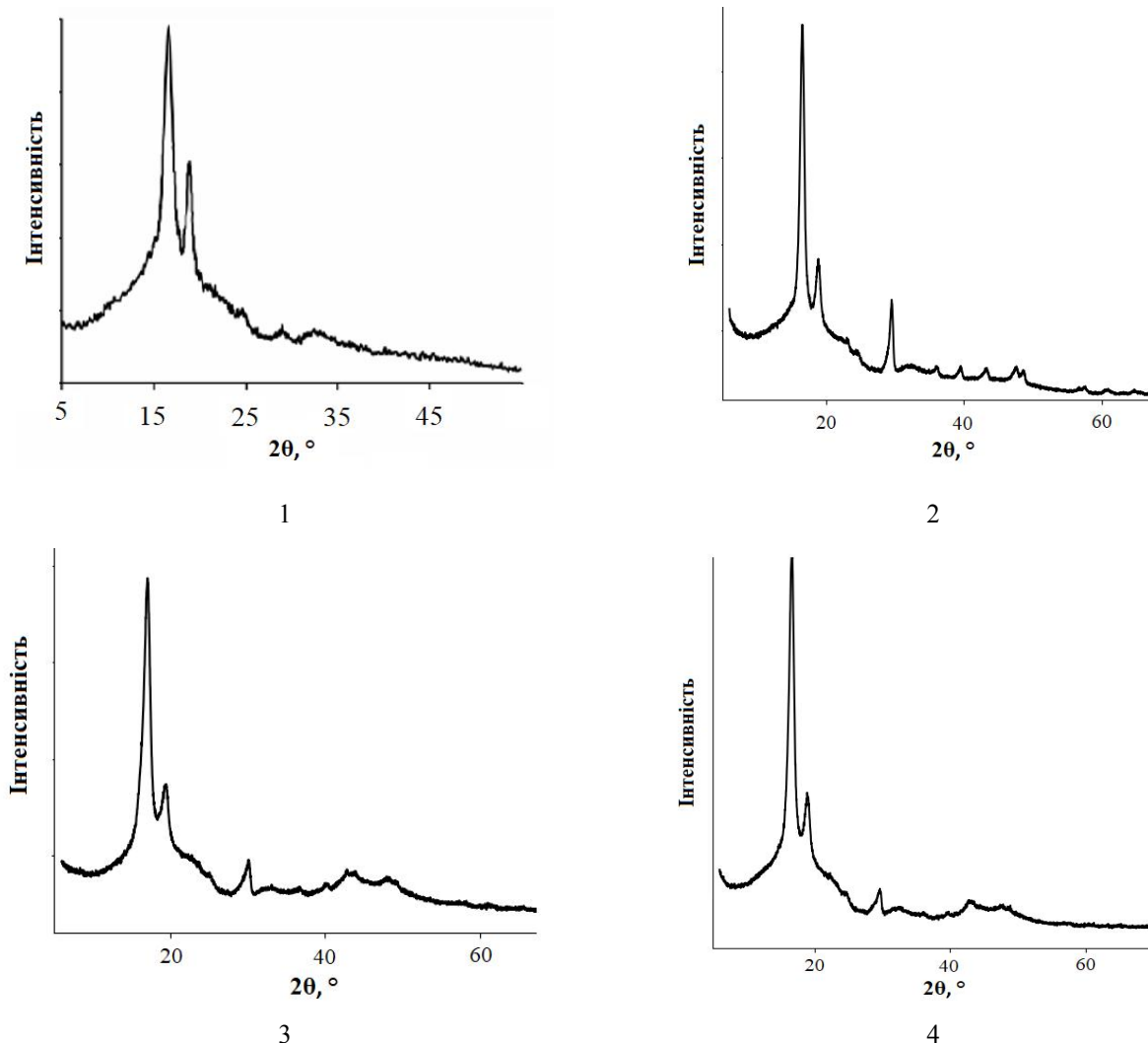


Рис. 4. Дифрактограма полілактичних композитів.

Склад композицій, % мас.: 1 – ПЛА:крохмаль:ЕСО:СаСО₃ = 100:0:0:0;
2 – ПЛА:крохмаль:ЕСО:СаСО₃ = 94:0:1:5; 3 – ПЛА:крохмаль:ЕСО:СаСО₃ = 85:0:10:5;
4 – ПЛА:крохмаль:ЕСО:СаСО₃ = 75:10:10:5

Встановлено, що додавання карбонату кальцію покращує загальну кристалічність композиту. Наявність ЕСО істотно не змінює кристалічну структуру, вказуючи на те, що він діє більше як пластифікатор або модифікатор міцності, а не як агент, що впливає на кристалічність ПЛА матриці. Збільшення вмісту ЕСО до 10 % мас., різкість піку залишається, але спостерігається невелике розширення піку, що свідчить про збільшення аморфних

областей. Це вказує на те, що вищий вміст ЕСО знижує загальну кристалічність.

Додавання до композиції 10 % мас. крохмалю, спостерігається помітне розширення та невелике зниження інтенсивності первинного піку при $2\theta = 16^\circ$. В цей же час другий пік при $2\theta = 18^\circ$ демонструє підвищену інтенсивність порівняно з попередніми композитами. Це, очевидно, пов'язано з утворенням нових кристалічних структур.

тур, що сприяє взаємодії між крохмалем і матрицею ПЛА [19].

Високий вміст ЕСО (15 % мас.), карбонату кальцію (15 % мас.) і крохмалю (25 % мас.) створює значні аморфні області, що значно знижує загальну кристалічність. Міжфазна взаємодія між полімерною матрицею, ЕСО, карбонатом кальцію та крохмалем, ймовірно, більш виражена, що призводить до різкого зниження кристалічності.

Загалом встановлено, що збільшення вмісту ЕСО та крохмалю в матриці ПЛА знижує кристалічність і покращує аморфні характеристики, тоді як карбонат кальцію діє як стабілізуючий агент, зберігаючи певний ступінь кристалічності навіть при вищих пропорціях наповнювача. Додавання 10 % мас. крохмалю в третій композит виділяється

збільшенням інтенсивності другого піку при $2\theta = 18^\circ$, що свідчить про специфічні структурні зміни в кристалічних областях композиту.

Подальший аналіз методом СЕМ дозволив оцінити розподіл наповнювачів, зміни структури та можливі дефекти, спричинені модифікацією композитів.

Виявлено (рис. 5), що для чистого ПЛА спостерігається рівномірна гладка структура без домішок чи дефектів, що підтверджує однорідність матриці. Введення наповнювачів призводить появи пор та мікротріщин, що може сприяти процесам водопоглинання та деградації матеріалів [20]. Межі між фазами чіткіше видні, що підтверджує зниження сумісності компонентів при високих концентраціях наповнювачів.

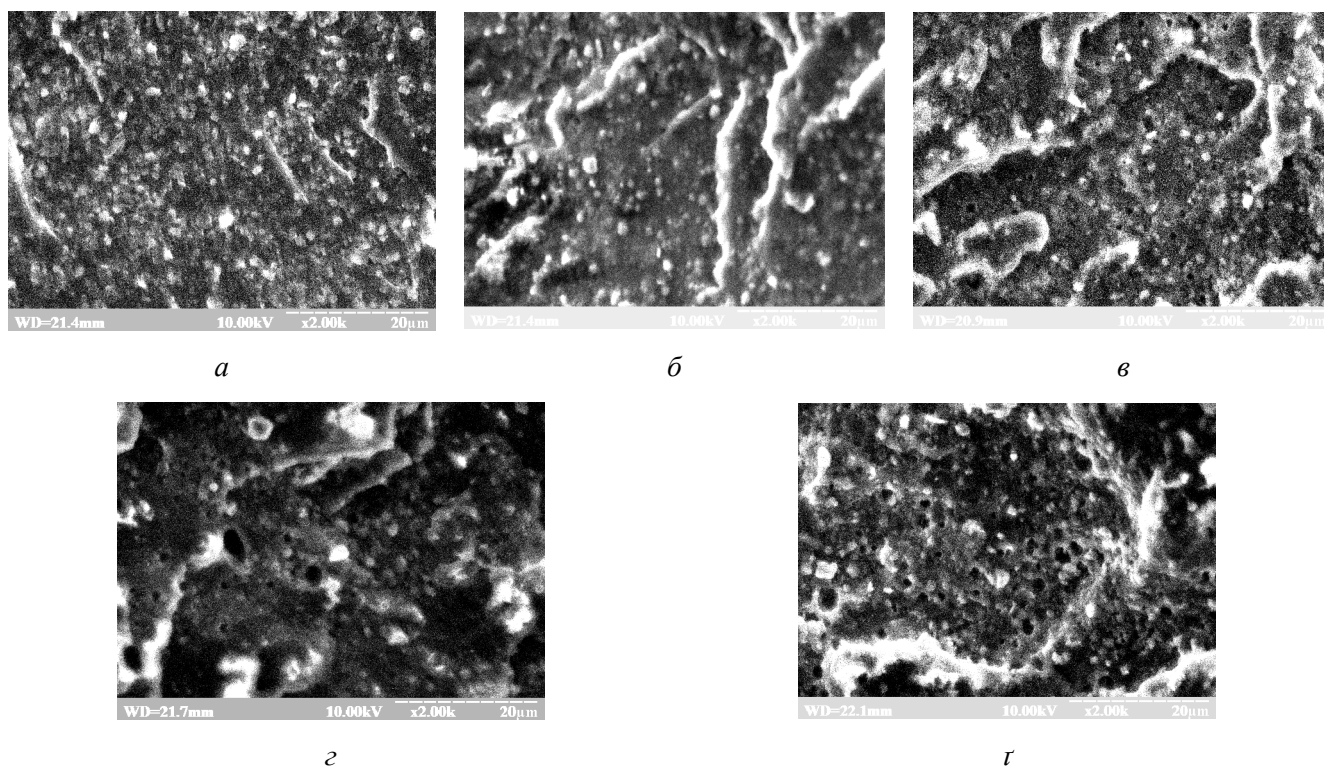


Рис. 5. СЕМ фотографії крохмаль-полілактидного композиту.

Склад композитів, % мас: а – ПЛА:крохмаль:ЕСО:СаСО₃ = 100:0:0:0;

б – ПЛА:крохмаль:ЕСО:СаСО₃ = 94:0:1:5; в – ПЛА:крохмаль:ЕСО:СаСО₃ = 85:0:10:5;

г – ПЛА:крохмаль:ЕСО:СаСО₃ = 75:10:10:5; г – ПЛА:крохмаль:ЕСО:СаСО₃ = 45:25:15:15

СЕМ зображення композиту, що містить 15 % мас. ЕСО, 15 % мас. СаСО₃ і 25 % мас. крохмалю, мають більш складну морфологію. І крохмаль, і ЕСО видно на поверхні ПЛА, поряд із скупченнями наповнювачів, розсіяних по всій матриці. Чіткий поділ фаз між ПЛА і наповнювачами

підкреслює недостатню сумісність у цій багатокомпонентній системі. Наявність мікрокрапель ЕСО та кластерів наповнювачів додатково вказує на недостатньо добре змішування, що може впливати на загальні механічні та структурні властивості композиту.

Висновки

Встановлено, що введення модифікаторів, зокрема крохмалю та епоксидованої соєвої оливи, в полілактиду матрицю покращує проникність матеріалу, тим самим прискорюючи біодеградацію.

Введення крохмалю і епоксидованої соєвої олії суттєво прискорює процес деградації ПЛА, причому суттєвіший вплив ЕСО, ймовірно, пов'язаний із підвищенням рухливості макромолекул і збільшенням доступності естерних зв'язків для гідролізу. Зміна інтенсивності смуг поглинання полілактиду, порівняно композитами, що містять крохмаль та ЕСО, свідчить про наявність у системі міжмолекулярних взаємодій, зокрема водневих зв'язків та проходження часткової кристалізації полілактиду під впливом компонентів системи.

Виявлено, що збільшення вмісту ЕСО та крохмалю в матриці ПЛА знижує кристалічність і покращує аморфні характеристики композитів. Встановлено, що композити, які містять у своєму складі 15 % мас. ЕСО, 15 % мас. CaCO_3 і 25 % мас. крохмалю, відзначаються більш складною морфологією, порівняно з полілактидними композитами без наповнювача.

Reference

1. Jung, H., Shin, G., Kwak, H., Hao, L. T., Jegal, J., Kim, H. J., Jeon, H., Park, J., Oh, D. X. (2023). Review of polymer technologies for improving the recycling and upcycling efficiency of plastic waste. *Chemosphere*, 320, 138089. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138089>.
2. Smith, J., Collins, H. P. (2007). Management of organisms and their processes in soils. *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry* (Third Edition), 471–502. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780080475141500214>.
3. Manea, E. E., Bumbac, C., Dinu, L. R., Bumbac, M., Nicolescu, C. M. (2024). Composting as a Sustainable Solution for Organic Solid Waste Management: Current Practices and Potential Improvements. *Sustainability*, 16 (15), 6329. <https://doi.org/10.3390/su16156329>.
4. Nemet, F., Perić, K., Lončarić, Z. (2021). Microbiological activities in the composting process: A review. *Columella Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 8 (2), 41–53. DOI:10.18380/SZIE.COLUM.2021.8.2.41.
5. Deeraj, B. D. S., Jayan, J. S., Saritha, A., Joseph, K. (2022). PLA-based blends and composites. *Biodegradable Polymers, Blends and Composites*, 237–281. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823791-5.00014-4>.
6. Naser, A. Z., Deiab, I., Darras, B. M. (2021). Poly(lactic acid) (PLA) and polyhydroxyalkanoates (PHAs), green alternatives to petroleum-based plastics: A review. *RSC Adv.*, 11, 17151–17196. <https://doi.org/10.1039/D1RA02390J>.
7. Naser, A. Z., Deiab, I., Defersha, F., Yang, S. (2021). Expanding poly(lactic acid) (PLA) and polyhydroxyalkanoates (PHAs) applications: A review on modifications and effects. *Polymers*, 13, 4271. <https://doi.org/10.3390/polym13234271>.
8. Wu, Y., Gao, X., Wu, J., Zhou, T., Nguyen, T., Wang, Y. (2023). Biodegradable Polylactic Acid and Its Composites: Characteristics, Processing, and Sustainable Applications in Sports. *Polymers*, 15(14), 3096. <https://doi.org/10.3390/polym15143096>.
9. Zaaba, N. F., Jaafar, M. (2020). A review on degradation mechanisms of polylactic acid: Hydrolytic, photodegradative, microbial, and enzymatic degradation. *Polym. Eng. Sci.*, 60, 2061–2075. <https://doi.org/10.1002/pen.25511>.
10. Piemonte, V., Gironi, F. (2013). Kinetics of Hydrolytic Degradation of PLA. *J. Polym. Environ.*, 21, 313–318. <https://doi.org/10.1007/s10924-012-0547-x>.
11. Lyu, L., Bagchi, M., Tsun, K., Ng, W., Markoglou, N., Chowdhury, R., An, C., Chen, Z., Yang, X. (2024). The degradation of polylactic acid face mask components in different environments. *J. Environ. Manag.*, 370, 122731. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122731>.
12. Kechur, D., Masyuk, A., Katruk, D., Kulish, B., Levytskyi, V. (2024). Combined composites based on polylactide 3D materials and polyurethane. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 7(2), 213–218. <https://doi.org/10.23939/ctas2024.02.213>.
13. Jung, H., Shin, G., Kwak, H., Hao, L. T., Jegal, J., Kim, H. J., Jeon, H., Park, J., Oh D. X. (2023). Review of polymer technologies for improving the recycling and upcycling efficiency of plastic waste. *Chemosphere*, 320, 138089. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138089>.
14. Masyuk, A. S., Kysil, Kh. V., Skorokhoda, V. I., Katruk, D. S., Kulish, B. I., Levytskyi, V. (2020). Osoblyvosti oderzhannia i vlastyvosti binarnykh sumishiv polilaktydiv. Ohliad. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 3(2), 146–156. Lviv: Vydvo Lvivskoi politekhniki.
15. Masyuk, A. S., Kechur, D. I., Kysil, K. V., Kulish, B. I., Levytskyi, V. Y. (2023). Physico-chemical interactions in plasticized starch materials. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 6, 124. <https://doi.org/10.23939/ctas2023.01.124>.

16. Rapa, M., Nita, R. N. D., Vasile, C. (2017). Influence of plasticizers over some physico-chemical properties of PLA. *Mater. Plast.*, 54, 73–78. <https://doi.org/10.37358/MP.17.1.4789>.
17. Wang, F., Nan, Z., Sun, X., Liu, C., Zhuang, Y., Zan, J., Dai, C., Liu, Y. (2022). Characterization of degradation behaviors of PLA biodegradable plastics by infrared spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 279, 121376. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.121376>
18. Masyuk, A., Levytskyi, V., Kysil, K., Bilyi, L., Humenetskyi, T. (2021). Influence of calcium phosphates on the morphology and properties of polylactide composites. *Materials Science*, 56, 870–876. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00506-5>
19. Levytskyi, V. E., Masyuk, A. S., Bilyi, L. M., Humenetskyi, T. V., Shybanova, A. M. (2020). Influence of silicate nucleation agent modified with polyvinylpyrrolidone on the morphology and properties of polypropylene. *Materials Science*, 55(4), 555–562. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00338-9>
20. Levytskyi, V., Katruk, D., Masyuk, A., Kysil, Kh., Bratychak, M. Jr., Chopyk, N. (2021). Resistance of polylactide materials to water mediums of the various natures. *Chemistry & Chemical Technology*, 15(2), 191–197.
21. Masyuk, A. S., Kechur, D. I., Kysil, K. V., Kulish, B. I., Levytskyi, V. Y. (2023). Physico-chemical interactions in plasticized starch materials. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 6, 124. <https://doi.org/10.23939/ctas2023.01.124>

B. I. Kulish, D. S. Katruk, A. S. Masyuk, B. V. Levytskyi, Yu. Yu. Tsiupka

Lviv Polytechnic National University,
Department of chemical technology of plastics processing

INFLUENCE OF MORPHOLOGY ON THE BIODEGRADABILITY OF PLASTICIZED POLYMER COMPOSITES

The impact of modifiers of different origins on the biodegradability of polylactide-based materials was investigated. It was found that incorporating starch and epoxidized soybean oil into the polylactide matrix accelerates the biodegradation of the polymer composite. The effect of starch and epoxidized soybean oil on intermolecular interactions within the system was examined. Based on X-ray structural analysis and scanning electron microscopy, it was determined that increasing the content of epoxidized soybean oil and starch in the polylactide matrix reduces crystallinity, enhances the amorphous characteristics of the material, and promotes the formation of materials with a more complex morphology.

Keywords: polylactide, starch, epoxidized soybean oil, biodegradability, polymer composite.