



<https://doi.org/10.15407/polymerj.48.03.131>

УДК 678.54

Тетяна ДМИТРИЄВА

ORCID: [0000-0002-3526-8395](https://orcid.org/0000-0002-3526-8395)

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України
48, Харківське шосе, Київ, 02155, Україна

Галина ГЛІЄВА

ORCID: [0000-0002-2916-0257](https://orcid.org/0000-0002-2916-0257)

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України
48, Харківське шосе, Київ, 02155, Україна

Володимир БОРТНИЦЬКИЙ

ORCID: [0000-0003-4954-6533](https://orcid.org/0000-0003-4954-6533)

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України
48, Харківське шосе, Київ, 02155, Україна

Валерій ДАВИДЕНКО

ORCID: [0000-0003-0771-2679](https://orcid.org/0000-0003-0771-2679)

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України
48, Харківське шосе, Київ, 02155, Україна

Сергій РЯБОВ

ORCID: [0000-0003-2996-3794](https://orcid.org/0000-0003-2996-3794)

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України
48, Харківське шосе, Київ, 02155, Україна

e-mail: Riabov.S@nas.gov.ua

АНАЛІЗ СТРУКТУРНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ У БІОДЕГРАДАБЕЛЬНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЯХ ЗАЛЕЖНО ВІД ПЛІВКОТВІРНИХ СКЛАДОВИХ І ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ДОБАВОК

Досліджено використання полімолочної кислоти (ПМК) і полікапролактону (ПКЛ) як плівкотвірних компонентів у композиціях з термопластичним крохмалем (ТПК). Розроблено оптимальний склад функціональної добавки для ТПК із використанням хітозану та молочної кислоти (лактату хітозану, ЛХ). Встановлено фізико-механічні характеристики композицій ПМК/ТПК і ПКЛ/ТПК. Методом ІЧ-спектроскопії вивчено будову композицій та зміни, що відбулися після термомеханічного оброблення. Виконано мас-спектрометричне дослідження та проаналізовано характеристичні мас-спектри іонних фрагментів термодеструкції ПМК, ЛХ і ПМК/ТПК, виміряно їхню інтенсивність в околі максимуму. Вивчено структурні зміни в композиціях методами ДСК і ТГА, кількісно встановлено втрату маси та її швидкість у процесі термодеструкції.

Ключові слова: термопластичний крохмаль, структуротвірні добавки, лактат хітозану, плівкотвірність.

Цитування: Дмитрієва Т., Глієва Г., Бортницький В., Давиденко В., Рябов С. Аналіз структурних перетворень у біодеградабельних полімерних композиціях залежно від плівкотвірних складових і функціональних добавок. *Полімерний журнал*. 2026. **48**, № 3. С. 131—140. <https://doi.org/10.15407/polymerj.48.03.131>

© Publisher PH “Akadempriodyka” of the NAS of Ukraine, 2026. This is an open access article distributed under the CC BY-ND 4.0 licence

Вступ

Основою біодеградабельних полімерних матеріалів, згідно з виконаним комплексом досліджень, є полімолочна кислота (ПМК), термопластичний крохмаль (ТПК), полікапролактон (ПКЛ), полівініловий спирт (ПВС), естери целюлози. Для забезпечення необхідних властивостей створених композицій із використанням цих полімерів до них додають функціональні добавки, які змінюють будову, термомеханічні та фізико-механічні характеристики композитів. Проаналізовано останні публікації щодо формування композицій з використанням індивідуальних, бінарних і потрійних систем полімерів.

У роботі [1] отримано потрійні змішані плівки ПМК/ПКЛ/ацетобутират целюлози (АБЦ) методом видування розплаву. Склад компонентів відібраний за прозорістю плівок, властивостями розтягу, змішуваністю, кристалічністю, молекулярною масою та хімічною структурою. Значне збільшення видовження спостерігали за вмісту 55—85 мас.% ПМК, 5—20 мас.% ПКЛ і 10—25 мас.% АБЦ. Такі матеріали мають значний потенціал для використання в медичних виробках [1].

Запропоновано [2] стратегію створення антибактеріальної високоміцної біорозкладної композиційної плівки складу ПМК/хітозан, модифікованої епоксидним подовжувачем (ЕП). Введення реакційноздатного складника підвищує сумісність компонентів, що дає змогу на 32 % поліпшити еластичність (або подовження при розриві) плівки; водночас вона розкладається на 42—45 % протягом 100 діб за умов біодеструкції.

У роботі [3] досліджено наповнення та армування ПМК наноцелюлозою (НЦ) і крохмалем (ТПК) за співвідношення ПМК:ТПК = 70:30 і 4—7 мас.% НЦ для поліпшення механічних властивостей і зниження вартості ПМК. Відмічено підвищення міцності на розрив і термічної стабільності композитів ПМК/ТПК/НЦ.

Досліджено [4] процес аеробного розкладання сумішей ТПК із ПМК і за різного вмісту цитринової кислоти (ЦК) як структуротвірного зшивального агента. Втрата ваги композиції під дією компостного чи морського середовища становила 56,9—77,5 %, причому переважно за рахунок ТПК через його аморфність і високу гідрофільність. При збільшенні концентрації

ЦК швидкість деструкції зростала, і після 50 діб випробування, як показали результати ТГА, основним компонентом суміші залишалася ПМК.

У роботі [5] проаналізовано властивості біорозкладних полімерних сумішей ТПК і ПМК із додаванням ЦК як потенційного компатибілізатора. На підставі дослідження фізико-хімічних характеристик методами електронної мікроскопії, диференціальної сканувальної калориметрії, проникності водяної пари, а також біорозкладання у ґрунті зроблено висновок про поліпшення адгезії між фазами ТПК і ПМК завдяки додаванню ЦК, забезпеченню однорідності структури та підвищенню сумісності компонентів суміші.

У роботі [6] автори проаналізували масове виробництво біополімеру ПМК, до якого додавали інші смоли й наповнювачі у формі волокон, мікро- чи наночастинок; різними методами вивчали зміну властивостей ПМК під дією добавок.

Виробництво біорозкладних матеріалів з використанням крохмалю, завдяки його доступності і низькій вартості порівняно з іншими біополімерами, потребує введення в композиції компатибілізаторів для забезпечення суміщення і належних механічних властивостей. Найефективнішими компатибілізаторами вважають цитринову кислоту та малеїновий ангідрид у композиціях крохмаль—ПМК [7]. Композиційні матеріали отримували методом екструзії та термічного інжекційного тиску. За властивостями матеріали були однорідні та придатні до застосування там, де потрібна механічна стійкість. Додавання ТПК до композиції ПМК дало змогу знизити температуру склування сумішей ПМК/ТПК і забезпечити швидку біодеструкцію на 68 % після витримання в ґрунті протягом 4 тижнів [8]. У роботі [9] досліджено використання крохмалю за високого вмісту амілози (48,4 мас.%) у біокомпозитах на основі ПМК і його вплив на механічні характеристики й водопоглинання біокомпозитів, які безпосередньо залежали від вмісту крохмалю.

Істотне значення при досягненні необхідних характеристик біокомпозитів ПМК/ТПК має пластифікувальна добавка. В роботі [10] досліджено використання малеїнізованої конопляної олії (МКО) як пластифікатора й

компатибілізатора в суміші ПМК/ТПК = 80/20. Додавання 7,5 мас.% МКО покращувало пластичні властивості матеріалу завдяки компатибілізуювальній здатності МКО та природним антиоксидантам, що містяться в олії.

Значний попит мають біосумісні матеріали для біомедицини. Досліджено використання полікапролактону (ПКЛ) і ПМК у композиціях з наночастинками оксиду цинку для регенерації підшкірної тканини [11]. За допомогою ІЧ-спектроскопії встановлено, що наночастинки ZnO взаємодіяли переважно з карбонільними групами ПКЛ. Збільшення кількості ZnO сприяло утворенню більш компактною поверхні, деградації/резорбції імплантованого матеріалу та регенерації м'яких тканин [11].

Для розширення спектра застосування ПМК досліджено введення в суміші композиції високогнучкого полімеру, яким обрано ПКЛ завдяки його пластичності та біорозкладності [12]. Для поліпшення суміщення ПМК і ПКЛ додавали гліцидилметакрилат (ГДМ) і нанокарбонат кальцію (НКК), що посилювали адгезію на межі розділу між ПМК і ПКЛ. Спектроскопічний аналіз показав, що відбувається реакція між епоксидною групою ГДМ і гідроксильними й карбоксильними групами ПМК і ПКЛ. Реологічними дослідженнями доведено позитивний вплив добавок ГДМ і НКК [12].

Введення 10 мас.% ПБАТ і 3,5—7,0 мас.% прищепленого до ПМК малеїнового ангідриду як компатибілізатора поліпшували міцність і сумісність термопластичних сумішей ТПК—ПМК [13].

З наведеного огляду результатів досліджень видно, що наразі активно триває пошук складу композицій з властивостями біорозкладності, еластичності, міцності, а також відповідності вимогам використання в харчовій промисловості та біомедицині.

Метою нашого дослідження було вивчення структурних перетворень у плівкотвірних композиціях (ПМК (ПКЛ) + ТПК) із функціональною добавкою на основі хітозану та молочної кислоти (лактату хітозану).

Експериментальна частина

В дослідженнях використовували полімолочну кислоту (MonoFilament, Україна, $M_w = 274000$ g/mol) і полікапролактон (Китай, $M_n = 60000$ — 80000), хітозан (Aldrich) середньої

молекулярної маси ($M_w \sim 190,000$ — $310,000$) зі ступенем деацетилювання 75—85 %, молочну кислоту (Китай, 80 %-вий водний розчин), гліцерин (фарм 99,8 %), крохмаль кукурудзяний (Interstarch, Україна).

Задля забезпечення структуротвірних властивостей композицій як функціональні добавки обрано хітозан (поліаміносахарид) і молочну кислоту $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{COOH}$; цей вибір обґрунтовується дослідженнями інших авторів, результати наведено в огляді [14]. Для введення хітозану в композицію його розчиняли в молочної кислоті за співвідношення компонентів 2:1 відповідно. Концентрація хітозану становила 5 мас.%. Розчину надано назву «лактат хітозану» (ЛХ).

ТПК готували шляхом додавання до кукурудзяного крохмалю гліцерину як пластифікатора за температури 90 ± 2 °C у процесі термомеханічного оброблення та подальшого введення розчину лактату хітозану (ЛХ). Суміш компонентів перемішували на водяній бані протягом 60 хв і далі отриману композицію ТПК витримували за кімнатної температури протягом 24 год.

Отриманий ТПК протягом 10—15 хв розтирали з порошками ПМК і ПКЛ, суміші пресували за температури 120—140 °C і випробовували плівки на міцність (σ , МПа) й еластичність (ϵ , %) на розривній машині марки 1P20 за швидкості руху 60 мм/хв.

Термічну деструкцію композитів вивчали методом термогравіметричного аналізу (ТГА) на обладнанні TA Instruments TGA Q500 за швидкості лінійного нагрівання 20 °C/хв у діапазоні температур від 20 до 700 °C в атмосфері повітря.

Теплофізичні характеристики зразків вивчали методом диференціальної сканувальної калориметрії (ДСК) на приладі DSC Q2000 виробництва компанії TA Instruments (США). Нагрівання зразків відбувалося від 20 до 200 °C за швидкості нагрівання 20 °C/хв. Точність вимірювання температури становила $\pm 0,01$ °C, а теплового потоку $\pm 0,01$ Дж/г.

ІЧ-спектри з Фур'є-перетворенням реєстрували в режимі порушеного повного внутрішнього відбиття (ATR) в діапазоні хвильових чисел 4000—600 cm^{-1} з використанням спектрометра Tensor 37 (Bruker, Німеччина) з роздільною здатністю 2 cm^{-1} .

Для виявлення структурних перетворень плівкотвірних композицій були проведені

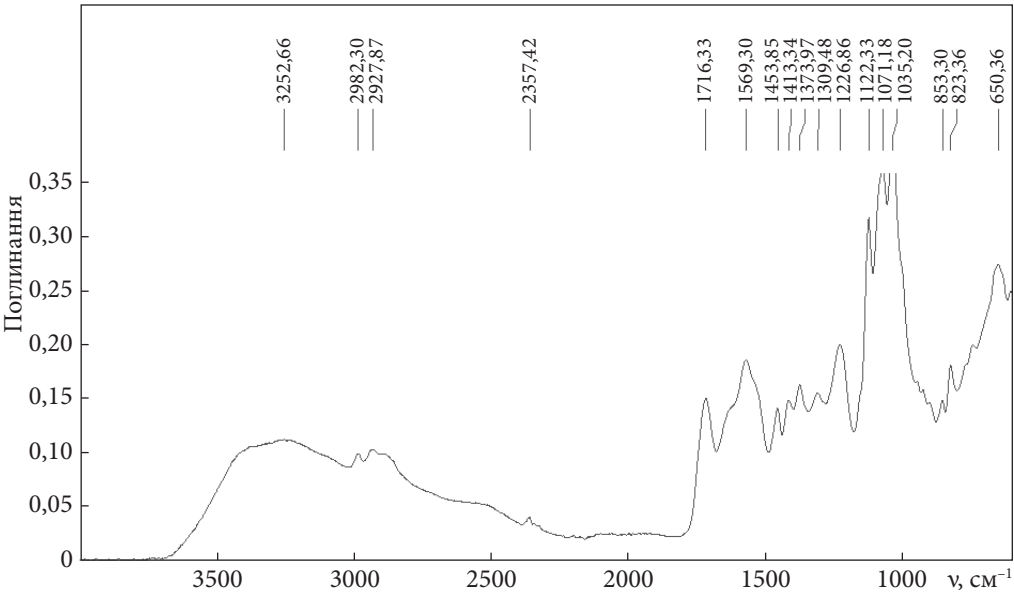


Рис. 1. ІЧ-спектр ЛХ

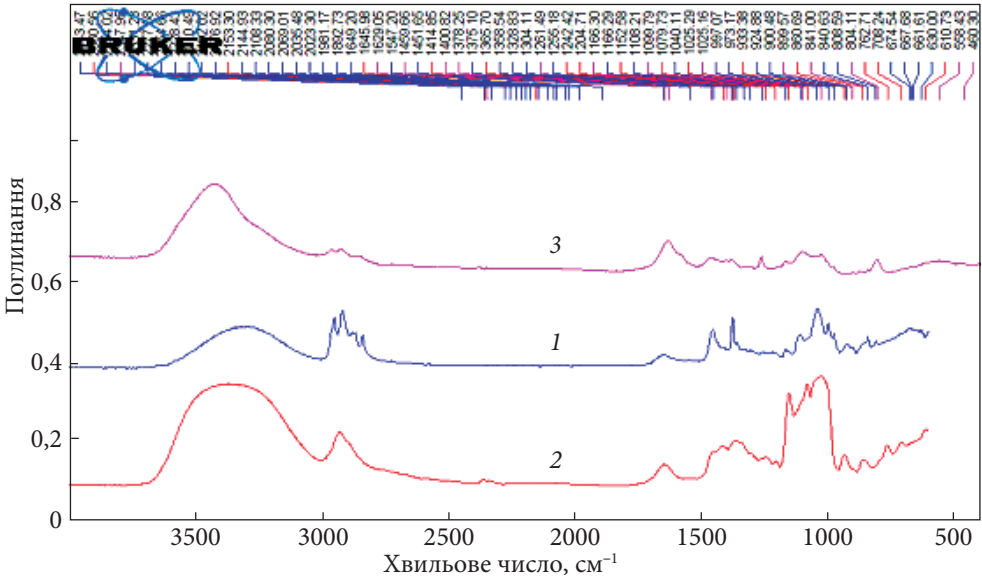


Рис. 2. ІЧ-спектри: плівкотвірної композиції № 3 ПМК +ТПК (1); кукурудзяного крохмалю (2) та ПМК (3)

Таблиця 1. Фізико-механічні характеристики композицій

Номер зразка	Склад композиції	Вміст, мас. %	Температура, °С, тривалість пресування, хв	Міцність (σ_r), МПа	Еластичність (ϵ_r), %
ТПК	Крохмаль	60	120	3,02	40,5
	Гліцерин	30	10 хв		
2	ЛХ	10			
	ПМК	100	140	16,46	55,2
			15 хв		
3	ТПК	70	130	3,52	25,5
	ПМК	30	10 хв		
4	ПКЛ	100	65	15,20	189,0
			10 хв		
5	ТПК	70	120	4,79	21,8
	ПКЛ	30	10 хв		

дослідження методом піролітичної мас-спектрометрії на мас-спектрометрі МХ 1321 у діапазоні температур 25—400 °С за швидкості нагрівання 6 ± 1 °С/хв.

Результати дослідження та їх обговорення

На рис. 1 наведено ІЧ-спектр плівки ЛХ, на якому смуга поглинання 1569 см^{-1} належить деформаційним коливанням аміногрупи — NH_3^+ та асиметричним валентним коливанням COO^- , а смуга 1716 см^{-1} відповідає валентним коливанням — COOH -груп, що свідчить про реакційну здатність цього компонента при створенні ТПК і плівкотвірних композицій.

У табл. 1 наведені фізико-механічні характеристики ТПК і композицій з використанням ПМК і ПКЛ.

Введення 70 мас.% ТПК знижує фізико-механічні характеристики полімерів, проте переважний вміст ТПК у композиції має істотний позитивний вплив значно поліпшуючи деградабельні властивості матеріалів.

Для визначення структури композиції з використанням ПМК методом ІЧ-спектроскопії дослідили плівковий зразок композиції № 3 ПМК + ТПК, спектр якого наведений на рис. 2.

В ІЧ-спектрі композиції № 3 смуги поглинання $2952\text{—}2839\text{ см}^{-1}$ інтенсивніші порівняно з відповідними смугами для ПМК (крива 3) і відповідають валентним коливанням C—H -зв'язків. Більшою інтенсивністю відзначаються і смуги поглинання в діапазоні $1454\text{—}1372\text{ см}^{-1}$, які відповідають деформаційним коливанням CH -груп. Смуга 1629 см^{-1} , наявна в спектрі ПМК і відповідна COOH -групі, у спектрі композиції № 3 практично не фіксується, що свідчить про утворення водневих зв'язків між карбонільними групами ПМК і гідроксильними групами ТПК у процесі термомеханічного оброблення.

Для виявлення структурних перетворень плівкотвірних композицій ТПК — синтетичний полімер було досліджено термодеструкцію ПМК, ТПК і ПМК + ТПК методом піролітичної мас-спектрометрії.

Полімолочна кислота (ПМК) є термопластичним біодеградуєбельним полімером, що виробляється з природновідновлюваної сировини синтетичним або ферментативним методом, з температурою плавлення $170\text{—}180$ °С.

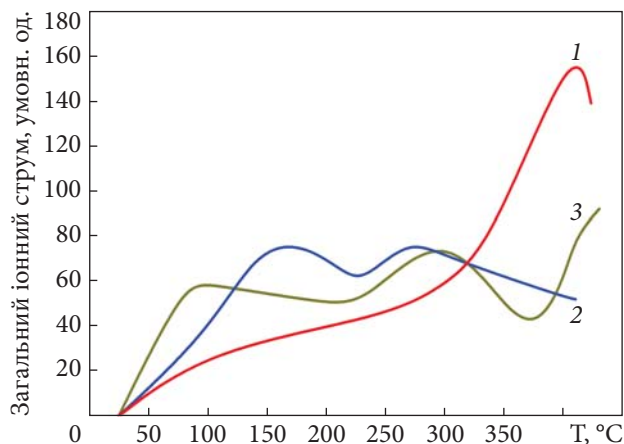


Рис. 3. Температурна залежність загального іонного струму виділення летких продуктів термодеструкції: ПМК (1); ЛХ (2) та композиції № 3 (3)

Таблиця 2. Характеристичний мас-спектр летких продуктів термодеструкції ПМК і їхня інтенсивність в околі температурного максимуму 410 °С

m/z	Іонний фрагмент	$I \cdot 10^4$ ум. од.
43	CH_3CO	13,03
69	$\text{C}_4\text{H}_5\text{O}$, C_5H_9	10,78
41	C_3H_5	8,75
70	$\text{C}_4\text{H}_5\text{OH}$	8,06
57	$\text{C}_2\text{H}_5\text{CO}$, C_4H_9	7,93
55	$\text{C}_3\text{H}_3\text{O}$	7,51
71	$\text{C}_4\text{H}_6\text{OH}$	5,89
83	C_6H_{11}	5,21
56	$\text{C}_3\text{H}_4\text{O}$	4,95
111	C_8H_{15}	4,03
42	C_3H_6	4,02
85	C_6H_{13}	3,64
84	C_6H_{12}	3,35
125	$\text{C}_7\text{H}_9\text{O}_2$, C_9H_{17}	1,74
126	$\text{C}_7\text{H}_{10}\text{O}_2$	1,41

Примітка. Загальна кількість фрагментів в околі максимуму 410 °С $n = 49$, $\text{max } m/z$ 154.

Таблиця 3. Характеристичний мас-спектр летких продуктів термодеструкції ЛХ і їхня інтенсивність в околі температурного максимуму 270 °С

m/z	Іонний фрагмент	$I \cdot 10^4$ ум. од.
44	CO_2	3,39
18	H_2O	3,08
45	$\text{C}_2\text{H}_7\text{N}$; $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$	2,22
43	$\text{C}_2\text{H}_5\text{N}$; CH_3CO	1,23
28	CO ; N_2	1,12
17	OH	0,67
29	CH_3N ; CHO	0,64
56	$\text{C}_3\text{H}_4\text{O}$	0,42
27	CHN	0,39
55	$\text{C}_3\text{H}_5\text{N}$; $\text{C}_3\text{H}_3\text{O}$	0,34
69	$\text{C}_4\text{H}_5\text{O}$; $\text{C}_4\text{H}_7\text{N}$; C_5H_9	0,27

Примітка. Загальна кількість фрагментів в області максимуму 270 °С $n = 20$, $\text{max } m/z$ 69.

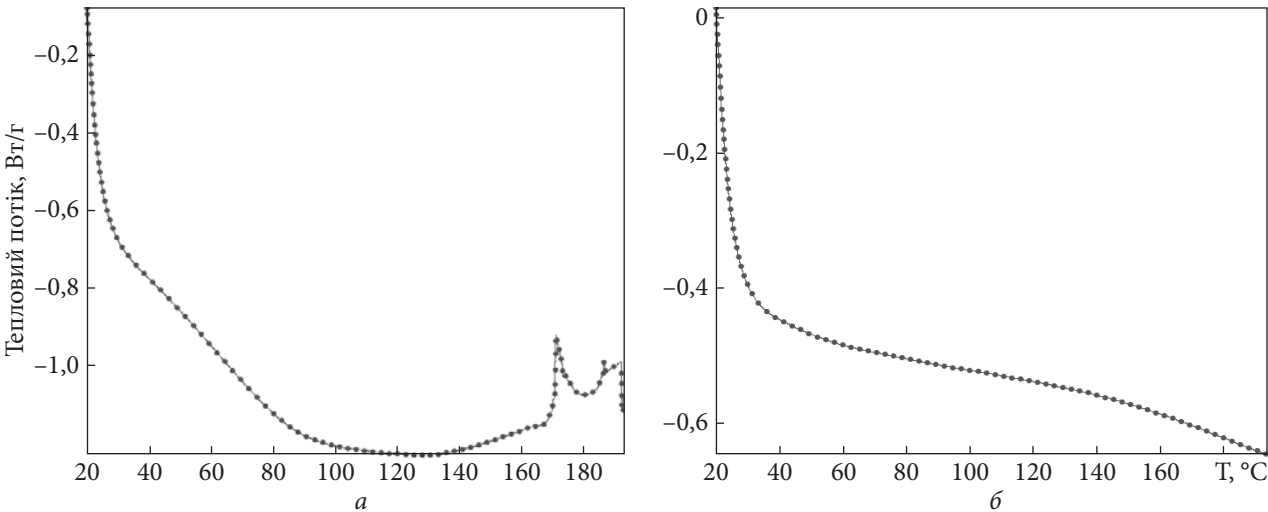


Рис. 4. Термограми ДСК зразка ТПК при першому (а) та другому прогріванні (б)

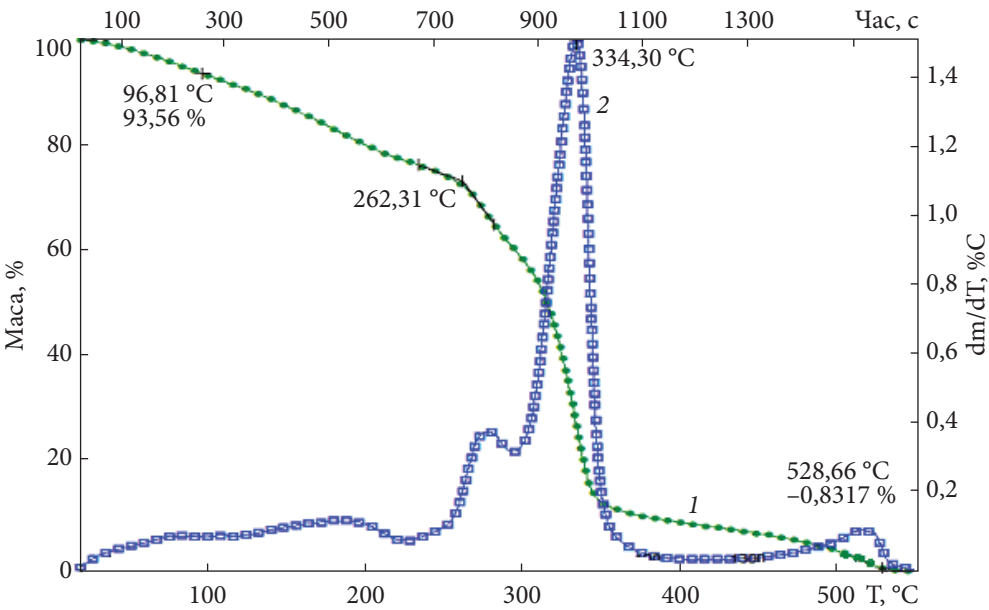


Рис. 5. Криві втрати маси і швидкості втрати маси зразка № 1 композиції ТПК

Таблиця 4. Склад характеристичних мас-спектрів летких продуктів термодеструкції зразка № 3 та їхня інтенсивність в околі температурних максимумів 300 і 430 °С

T = 300 °C			T = 430 °C		
m/z	Іонний фрагмент	I · 10 ⁴ ум. од.	m/z	Іонний фрагмент	I · 10 ⁴ ум. од.
18	H ₂ O	2,84	43	CH ₃ CO	2,36
43	CH ₃ CO	1,73	69	C ₄ H ₇ N; C ₄ H ₅ O	1,68
44	CO ₂	1,68	41	C ₂ H ₃ N; C ₃ H ₅	1,41
60	C ₂ H ₆ NO; C ₃ H ₈ O	1,44	57	C ₃ H ₅ O; C ₄ H ₉	1,36
29	CH ₃ N; CHO	1,20	55	C ₃ H ₅ N; C ₃ H ₃ O	1,33
31	CH ₃ O; CH ₅ N	1,05	70	C ₄ H ₆ O; C ₄ H ₈ N	1,30
57	C ₂ H ₅ CO; C ₄ H ₉	1,04	83	C ₅ H ₇ O; C ₅ H ₉ N	1,02
28	CO	0,85	71	C ₄ H ₇ O; C ₄ H ₉ N	0,99
73	C ₃ H ₅ O ₂ ; C ₃ H ₇ NO	0,66	56	C ₃ H ₄ O; C ₃ H ₆ N	0,89
55	C ₃ H ₃ O; C ₃ H ₅ N	0,61	42	C ₂ H ₂ O; C ₂ H ₄ N	0,69
max m/x 98 n = 27			max m/x 125 n = 26		

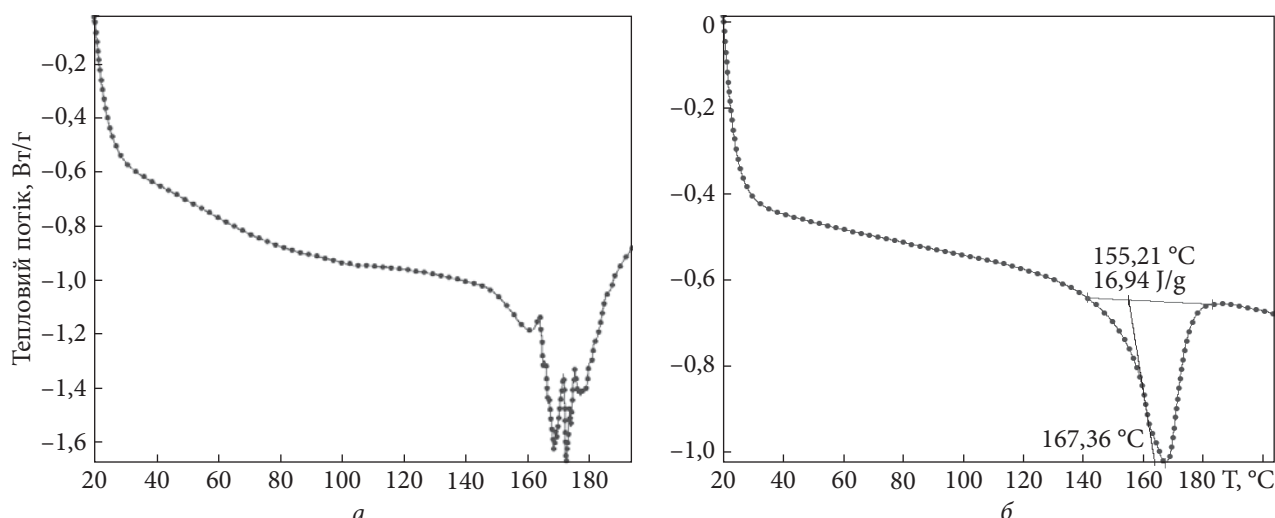


Рис. 6. Термограми ДСК зразка композиції ПМК + ТПК при першому (а) та другому прогріванні (б)

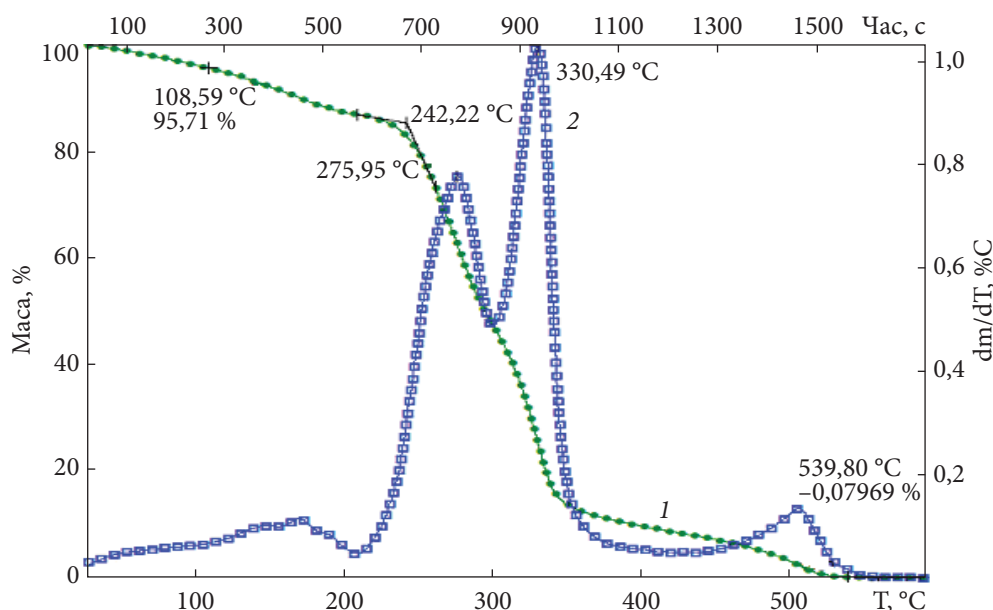


Рис. 7. Криві втрати маси (1) і швидкості втрати маси зразка № 3 композиції ПМК + ТПК (2)

Полікапролактон — представник біодеградабельних поліестерів, є напівкристалічним полімером з температурою плавлення 58—65 °С.

На рис. 3 наведено криві температурної залежності загального іонного струму виділення летких продуктів термодеструкції вихідного зразка ПМК (крива 1), ЛХ (крива 2) та композиції № 3 (крива 3)

У табл. 2 наведений характеристичний мас-спектр летких продуктів термодеструкції ПМК і їхня інтенсивність в околі максимуму 410 °С.

У табл. 3 наведений характеристичний мас-спектр летких продуктів термодеструкції ЛХ і їхня інтенсивність в околі максимуму 270 °С.

Склад характеристичних мас-спектрів летких продуктів термодеструкції зразка № 3 (ПМК + ТПК) за співвідношення компонентів 30:70 і їхня інтенсивність наведені в табл. 4.

Раніше проведеними дослідженнями було встановлено характеристичний мас-спектр непластифікованого кукурудзяного крохмалю за $T_{max} = 270$ °С: m/z 18, 60, 73, 43, 57, 44, 31, 29, 55, 28, 56 і max m/z 149 [15].

З аналізу наведених характеристичних даних у таблицях 2—4 можна зробити припущення, що іонні фрагменти m/z 18, 60 і 73 є наслідком термодеструкції крохмалю, фрагменти m/z 43, 69, 41, 70 і 57 є наслідком термодеструк-

ції ПМК, а m/z 44, 31, 57 і 73 є результатом модифікації крохмалю ЛХ.

Для виявлення структурних змін у композиціях, які є наслідком термомеханічного оброблення в процесі плівкоутворення, були проведені вибіркові дослідження композицій № 1 і № 3 методом ДСК. На рис. 4 наведені термограми ДСК зразка ТПК при першому (а) та другому прогріванні (б).

На наведених термограмах при першому прогріванні широкий ендотермічний пік фіксується в температурному діапазоні 110—140 °С, який при другому прогріванні відсутній. Наявність такого піка зумовлена релаксацією напружених зв'язків, яка виникає у процесі виготовлення плівкового зразка композиції ТПК. При подальшому прогріванні до $T = 200$ °С за рахунок плавлення зразка термограма вирівнюється.

Методом ТГА проаналізовано процес термодеструкції зразка № 1 композиції ТПК. На рис. 5 наведені криві ТГА втрати маси і швидкості втрати маси цього зразка.

Як видно з наведених даних, втрата маси відбувається з максимальною швидкістю за температури 334 °С і закінчується за температури 528 °С.

Досліджено методом ДСК плівкотвірний зразок композиції № 3 (ПМК+ТПК). На рис. 6 наведені термограми ДСК зразка № 3 при першому (а) та другому прогріванні (б).

На наведених термограмах ендотермічний пік при другому прогріванні стабілізується і становить 167 °С. Збільшення теплового потоку зразка композиції ПМК + ТПК за співвідношення компонентів 30:70, порівняно з термограмою зразка ТПК, зумовлено наявністю ПМК, температура плавлення якої становить 160—170 °С.

На рис. 7 наведені криві ТГА втрати маси і швидкості втрати маси зразка № 3 композиції ПМК + ТПК за співвідношення компонентів 30:70.

На наведених кривих втрата маси характеризується максимальною швидкістю з двома максимумами за температури 276 і 330 °С та закінчується за температури 539 °С. Порівняно з ТГА термопластичного крохмалю спостерігається істотне підвищення швидкості втрати

маси за температури 276 °С, що, очевидно, зумовлено взаємодією ПМК із ЛХ при термомеханічному виготовленні.

Висновки

На підставі проведених досліджень бінарних композицій ПМК+ТПК визначено технологічний режим термопластичного оброблення та їхні фізико-механічні характеристики. Досліджено доцільність використання лактату хітозану для модифікації ТПК. Зміни структури композиції ПМК+ТПК проаналізовано методами ІЧ-спектроскопії, мас-спектрометрії, ДСК і ТГА.

Встановлено оптимальний склад ТПК, який забезпечує необхідні фізико-механічні характеристики полімерній композиції з урахуванням введення лактату хітозану як структуротвірної функціональної добавки.

Аналіз змін ІЧ-спектра композиції ПМК + ТПК після її термомеханічного оброблення вказує на взаємодію карбонільних груп ПМК із гідроксильними групами ТПК.

На підставі дослідження композицій полімер—ТПК методами ДСК і ТГА кількісно встановлено втрату маси і швидкість втрати маси плівкових зразків у процесі термодеструкції.

Методом піролітичної мас-спектрометрії отримано і проаналізовано характеристичні мас-спектри летких продуктів термодеструкції ПМК + ТПК і виявлено структурні перетворення у композиціях.

Внесок авторів

Ця стаття була написана за участю всіх авторів. Усі автори затвердили остаточну версію рукопису.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Доступність даних

Дані, що підтверджують висновки цього дослідження, можна отримати у відповідального автора за обґрунтованим запитом.

REFERENCES

1. Tauncharoensri N., Ross G.M., Kongprayoon A. et al. In situ compatibilized Blends of PLA/PCL/CAB Melt — Blown Films with High Elongation: Investigation of miscibility, morphology, Crystallinity and modeling. *Polymers*, 2023, 15:303. <https://doi.org/10.3390/polym15020303>.
2. Yan T., Wang X., Qiao Y. Strategy to Antibacterial, High — mechanical and Degradable Polylactic Acid/Chitosan Composite Film Through Reactive Compatibilization Via Epoxy Chain Extender. *ACS Omega*, 2024, 9: 27312—27320. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01849>.
3. Li Z., Lin Y., Cheng H., Qian S., Fang X. Synergistic effects of thermoplastic starch and nanofibrillated cellulose on the mechanical, thermal, and micromorphological properties of polylactic acid composites. *Polymer Composites*, 2025, 46, 9: 8336—8348.
4. Moreno-Bohorquez E., Arias-Tapia M.J., Martínez-Villadiego K., Rhenals-Julio J.D., Jaramillo A. F. Effect of starch Variety and Environmental Conditions on the Aerobic Biodegradation of Citric Acid-Compatibilized Termoplastic Starch/Polylactic Acid Blends. *Polymers*, 2025, 17: 1295. <https://doi.org/10.3390/polym17101295>.
5. Jozinović A., Kovač, M., Ocelić Bulatović V., Kučić Grgić D., Miloloža M., Šubarić D., Ačkar Đ. Biopolymeric blends of thermoplastic starch and polylactide as sustainable packaging materials. *Polymers*, 2024, 16(9), 1268. <https://doi.org/10.3390/polym16091268>.
6. Castro — Aguirre E., Inigues — Franco F., Samsudin H., Fang X., Auras R. Poly (lactic acid) — mass production, processing, industrial applications and end of life. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2016, 107: 333—366. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.03.010>.
7. da Silva S. C., Simões, B. M., Yamashita F., de Carvalho F. A. Compatibilizers for biodegradable starch and poly (lactic acid) materials produced by thermoplastic injection. *Research, Society and Development*, 2022, V.11, no. 14: 36521.
8. Salazar-Sánchez M. R., Delgado-Calvache L. I., Casas-Zapata J. C., Villada-Castillo H. S., Solanilla-Juque, J. F. Soil Biodegradation of a Blend of Cassava starch and Polylactic Acid. *Ingeniería Investigación*, 2022, 42, № 3: 93710. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.93710>.
9. Estrada-Girón Y., Fernández-Escamilla V.V.A., Martín-del-Campo A., González-Nuñez R., Canché-Escamilla G., Uribe-Calderón J., Moscoso-Sánchez F.J. Characterization of Polylactic Acid Biocomposites Filled with Native Starch Granules from Dioscorea remotiflora Tubers. *Polymers*, 2024, 16: 899. <https://doi.org/10.3390/polym16070899>.
10. Lerma-Canto A., Gomez-Caturla J., Herrero-Herrero M., Garcia-Garcia D., Fombuena V. Development of Polylactic Acid Thermoplastic Starch Formulations Using mateinized Hemp Oil as. Biobased Plasticizer. *Polymers (Basel)*. 2021, 13: 1392. <https://doi.org/10.3390/polym13091392>.
11. Negaresh M., Javadi A., Garmabi H. Poly(lactic acid)/poly(ε—caprolactone) blends: the effect of nanocalcium carbonate and glycidyl methacrylate on interfacial characteristics. *Polymeric and Composite materials*. 2024, 11, 1377340. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1377340>.
12. Castro, J. I., Araujo-Rodríguez, D. G., Valencia-Llano, C. H., López Tenorio, D., Saavedra, M., Zapata, P. A., & Grande-Tovar, C. D. Biocompatibility Assessment of Polycaprolactone / Polylactic Acid/Zinc Oxide conditions for Biomedical Applications. *Pharmaceutics*. 2025, 17, № 9: 1113. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15092196>.
13. Tachaphiboonsap S., Jarukumjorn K. Toughness and Compatibility Improvement of Thermoplastic Starch/Poly (lactic acid) Blends. *Advanced materials Research*. 2013, 747, 67—71. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.747.67>.
14. Dmytrieva T., Glieva G., Bortnytskyi V., Logvinenko P., Riabov S. Functional biodegradable materials based on natural and synthetic polymers with antibacterial action. *Polimernyi Zhurnal*. 2025, 47, № 4: 185—190. <https://doi.org/10.15407/polymerj.47.04.185>.
15. Dmytrieva T., Glieva G., Bortnytskyi V., Logvinenko P., Riabov S. Influence choice of structure-forming fuctional additives on structure and degradable film formation composition thermoplastic starch — polyethylene. *Polimernyi Zhurnal*. 2025, 47, № 4: 208—214. <https://doi.org/10.15407/polymerj.47.04.208>.

Received 22.06.2026

Accepted 01.09.2026

Published 19.10.2026

Tetiana Dmytrieva

ORCID: 0000-0002-3526-8395

Institute of Macromolecular Chemistry of the NAS of Ukraine

48, Kharkivske Highway, Kyiv, 02155 Ukraine

Galyna Glieva

ORCID: 0000-0002-2916-0257

Institute of Macromolecular Chemistry of the NAS of Ukraine

48, Kharkivske Highway, Kyiv, 02155 Ukraine

Volodymyr Bortnytskyi

ORCID: 0000-0003-4954-6533

Institute of Macromolecular Chemistry of the NAS of Ukraine

48, Kharkivske Highway, Kyiv, 02155 Ukraine

Valeriy Davydenko

ORCID: 0000-0003-0771-2679

Institute of Macromolecular Chemistry of the NAS of Ukraine

48, Kharkivske Highway, Kyiv, 02155 Ukraine

Sergii Riabov

ORCID: 0000-0003-2996-3794

Institute of Macromolecular Chemistry of the NAS of Ukraine

48, Kharkivske Highway, Kyiv, 02155 Ukraine

e-mail: Riabov.S@nas.gov.ua

ANALYSIS OF STRUCTURAL TRANSFORMATIONS
IN BIODEGRADABLE POLYMER COMPOSITES AS A FUNCTION
OF FILM-FORMING COMPONENTS AND FUNCTIONAL ADDITIVES

The use of polylactic acid (PLA) and polycaprolactone (PCL) as film-forming components in composites with thermoplastic starch (TPS) was investigated. An optimal composition of the functional additive in TPS was developed using chitosan and lactic acid (chitosan lactate, LC). The physical and mechanical properties of the PLA/TPS and PCL/TPS composites were determined. The structure of the composites and its changes following thermomechanical treatment were studied using FT-IR spectroscopy. Mass spectrometric analysis was performed, and the characteristic mass spectra of ion fragments resulting from the thermal decomposition of PLA, LC, and PLA/TPS were analyzed; their intensities at the peak region were measured. Structural changes in the compositions were studied using DSC and TGA methods, and the mass loss and rate of mass loss during thermal decomposition were quantitatively determined.

Keywords: *thermoplastic starch, structure-forming additives, film-forming properties, chitosan lactate.*