

М. С. Кочетов, аспірант, Г. М. Черкашина, канд. техн. наук, доцент

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ БІОПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО БІОПЛАСТИКУ ТА ВІДПРАЦЬОВАНОЇ КАВОВОЇ ГУЩІ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Ключові слова: екологія, безпека, біополімери, композити, термопластичність, кавова гуща.

Вступ. Пластмаси поширені в сучасному житті завдяки своїм чудовим механічним, тепловим та хімічним властивостям у поєднанні з низькою вартістю та простотою виробництва [1]. Протягом останніх десятиліть використання пластмас зросло в геометричній прогресії, що зумовлено попитом у широкому спектрі галузей промисловості, включаючи упаковку, автомобільну промисловість, будівництво та охорону здоров'я. Однак це швидке зростання призвело до значних екологічних проблем, включаючи сильну залежність від викопних ресурсів, внесок у зміну клімату через викиди парникових газів, та повсюдне забруднення навколишнього середовища небіодеградабельними пластиковими відходами [2]. Ці проблеми прискорили розробку альтернативних матеріалів, зокрема біологічних та біодеградабельних полімерів, таких як полімолочна кислота (ПЛА) [3], полібутиленсукцинати (ПБС), полібутиленадіпатефталати (ПБАТ) та полігідроксиалканоати (ПГА), які призначені для заміни традиційних пластмас на основі викопного палива [4,5]. Незважаючи на ці досягнення, частка біопластиків на світовому ринку залишається дуже малою порівняно з пластиками на основі нафти. Основним обмеженням є те, що біопластикам часто бракує механічних та фізичних характеристик, необхідних для багатьох вимогливих застосувань, що обмежує їхню конкурентоспроможність. Крім того, їх виробничі витрати значно вищі, що обмежує їх використання, особливо для низьковитратних застосувань з великим обсягом виробництва, таких як упаковка харчових продуктів [6]. Вирішення цих проблем має вирішальне значення для ширшого впровадження біопластиків.

Одним із можливих напрямів отримання екологічно безпечних біодеградабельних матеріалів є модифікація традиційних полімерів. Поєднання синтетичного полімеру з природними органічними наповнювачами (наприклад, крохмалем, рисовою лузгою, деревним борошном) або відходами споживання може надавати матеріалу новий набір властивостей, зокрема підвищену здатність до швидкої біодеградації [7]. Водночас харчова промисловість генерує величезну кількість сільськогосподарських та промислових побічних відходів, таких як пшеничні висівки, дробина, корінці ячменю, ріпакова макуха, сироватка, виноградні вичавки, жом цукрового буряка, фінікові вичавки, кавова срібна шкірка, кавова гуща та лушпиння какао-бобів. Серед них кавова гуща (КГ), побічний продукт процесу варіння кави, привернула значну увагу як універсальний та екологічний матеріал. У контексті полімерної науки, лігноцелюлозний склад КГ, багатий на целюлозу, геміцелюлозу, лігнін, білки та ліпіди, робить його перспективним кандидатом для підвищення продуктивності та стійкості біополімерних композитів. Попередні дослідження продемонстрували інтеграцію КГ у різні біополімери, такі як ПЛА [8], суміші ПЛА/полігідроксибутирату (ПГБ) [9], полібутиленсукцинат (ПБС), та

ПБАТ, з різним впливом на фізичні, механічні та теплові властивості отриманих композитів. Наприклад, Бомфін та ін. виявили, що включення 10–30 мас.% КГ до ПЛА змінює кристалічність, знижує температуру склування та підвищує в'язкість при помірних рівнях наповнювача, хоча вищий вміст призводить до збільшення пористості та зниження густини [8]. Гайдукова та ін. повідомили, що додавання 20–60 мас.% КГ до ПБС збільшує жорсткість та мікротвердість, але знижує міцність на розрив та видовження при розриві зі збільшенням вмісту наповнювача [9]. Термічна стабільність знижується зі збільшенням завантаження КГ, тоді як кристалічність залишається стабільно високою (≥ 60 %). Аналогічно, Мустафа та ін. спостерігали, що включення КГ до ПБАТ знижує міцність на розтяг та пластичність, але покращує жорсткість, при цьому біокомпозити демонструють добру дисперсію та підвищену гідрофільність поверхні завдяки наявності гідрофільного лігноцелюлозного наповнювача [10]. Ці дослідження підкреслюють, що КГ може служити функціональним наповнювачем у біопластиках, але також показують, що властивості композитів значною мірою залежать від типу матриці, завантаження наповнювача та міжфазної сумісності. Хоча є кілька досліджень досліджували включення КГ до біополімерів [11,12], вплив фізико-хімічних КГ на взаємозв'язок структура-властивість біокомпозитів залишається недостатньо вивченим, що обмежує оптимізацію їх механічних та фізичних характеристик.

Актуальність представленої роботи обумовлена необхідністю пошуку шляхів створення міцних та еластичних біодеградабельних екологічно безпечних композицій на основі біополімерних пластиків з відходами КГ

Мета статті – дослідження екологічно безпечних біополімерних композитів на основі термопластичного біопластику та відпрацьованої кавової гущі.

Матеріали та методи. Об'єктами експериментального дослідження були:

– волога КГ з сортів Робусти та Арабіки у співвідношенні 50:50 мас. %, зібрані в 8 різних кав'ярнях «Аромакава» міста Харкова;

– термопластичний біопластик марки GEMABIO F (Gema Polimer Plastik Ürünleri San. ve Tic. A.S., Турція) на основі ПБАТ, який містить відновлювану сировину і має до 90 % вмісту вуглецю біопоходження. Вироби з GEMABIO повністю біодеградабельні та компостуються залежно від товщини виробу. Густина біопластику складає $1,379 \text{ г/см}^3$ з індексом плинності розтопу (MFI) 2–4 г/10 хв ($190 \text{ }^\circ\text{C}$, 2,16 кг).

Дослідження ударної в'язкості та руйнівної напруги при вигині модифікованого агломерату відходів ПА6 без надрізу за температури $20 \text{ }^\circ\text{C}$ проводилося на маятниковому копрі згідно з ISO 180 та ISO 178 відповідно.

Екологічно безпечні біодеградабельні композити одержували експериментально методом екструдювання попередньо підготовлених гранул GEMABIO F 2910* та КГ в одношнековому лабораторному екструдері при температурі $160\text{--}170 \text{ }^\circ\text{C}$ і швидкості обертання валка $30\text{--}100 \text{ об/хв}$. Співвідношення L/D екструдера становить 25 для підвищення однорідності розподілу КГ у готових екологічно безпечних біодеградабельних композитах.

Основні хімічні групи в екологічно безпечних біодеградабельних композитах визначено за смугами поглинання ІЧ-спектрів, які знімали на ІЧ-спектрофотометрі «Nicolet 380» (США), оснащеного блоком ослабленого повного відбиття (ATR). Кожен зразок сканували двадцять разів у діапазоні хвильових чисел $600\text{--}4000 \text{ см}^{-1}$ з роздільною здатністю 4 см^{-1} . Для визначення основних технологічних характеристик екологічно безпечних біодеградабельних композитів використано гідростатичний метод згідно

ISO 1183-1 для вимірювання густини зразка полімеру об'ємом не менше 1 см^3 , показник плинності розтопу (ППР) згідно ISO 1133 за допомогою приладу ПРТ-М при $190 \text{ }^\circ\text{C}$ та навантаженні 2,16 кгс та температурний інтервал топлення згідно ISO 3146 на лабораторному латунному диску розміром діаметр 50 мм товщина 19 мм з боковим отвором під термометр діаметром 9 мм.

Результати. Була початку досліджень за для уникнення проблеми спучування через великий вміст води була проведена підготовка КГ для вводу в склад термопластичного біопластику марки GEMABIO F. КГ просушено в сушильній шафі впродовж 4 годин при температурі $70 \text{ }^\circ\text{C}$ з перемішуванням кожні 30–40 хвилин, після чого температуру в сушильній шафі було підвищено до 105°C та просушено ще 20–30 хвилин для максимального видалення води з КГ. Після етапу просушування КГ представляла собою матеріал у вигляді різного розміру агломератів, які утворилися під час сушіння в процесі нагріву, через виділення маслянистих речовин які мають підвищену адгезію та взаємодіють між собою. Агломерати КГ розтовкли у керамічній ступі до однорідної дисперсної суміші. Було досліджено гранулометричний склад КГ. Для цього КГ просівали через розміри сит 400, 200 та 100 мкм. Частиці КГ, затримані на ситі 400 мкм складала біля 9,8 % мас., а частки КГ, затримані на ситі 200 мкм 81 % мас, а затримані на ситі 100 мкм – 9,2 % мас. Фактично, для дослідженої КГ характерне унімодальність гранулометричного складу з максимумом при 200 мкм. Одержані мікрофотографії КГ різних фракцій представлено на рис. 1.



Рисунок 1 – Мікрофотографії частинок КГ

А – фракція більша за 400 мкм, В – фракція 200 менша за 200 мкм

З результатів морфологічних досліджень, представлених на рис. 2, видно, що КГ характеризуються пластинчастою структурою частинок. Частинки усіх фракцій КГ, вкриті смоляними або маслянистими речовинами, про що свідчить помітний блиск на мікрофотографіях.

Для дослідження сумісності КГ та термопластичного біопластику марки GEMABIO F проведено потенціометричний аналіз їх поверхні. Обрано рН-метричний метод визначення рівня рН водних суспензій pH_0 (табл. 1). У водних суспензіях потенціометричним методом досліджувалась зміна рН з часом $pH_{\text{ІТ}}$ та розраховувались рН у рівноважному стані $pH_{\text{суп.}}^p$ – рис. 3 та табл. 1. В ході дослідження експериментально визначено, що поверхня термопластичного біопластику марки GEMABIO F має характер близький до нейтрального з слабо-основною силою активних центрів $pKa \approx 7,08-7,35$,

поверхня КГ має характер також близький до нейтрального з слабо-кислотною силою активних центрів $pK_a \approx 6,30 - 6,47$.

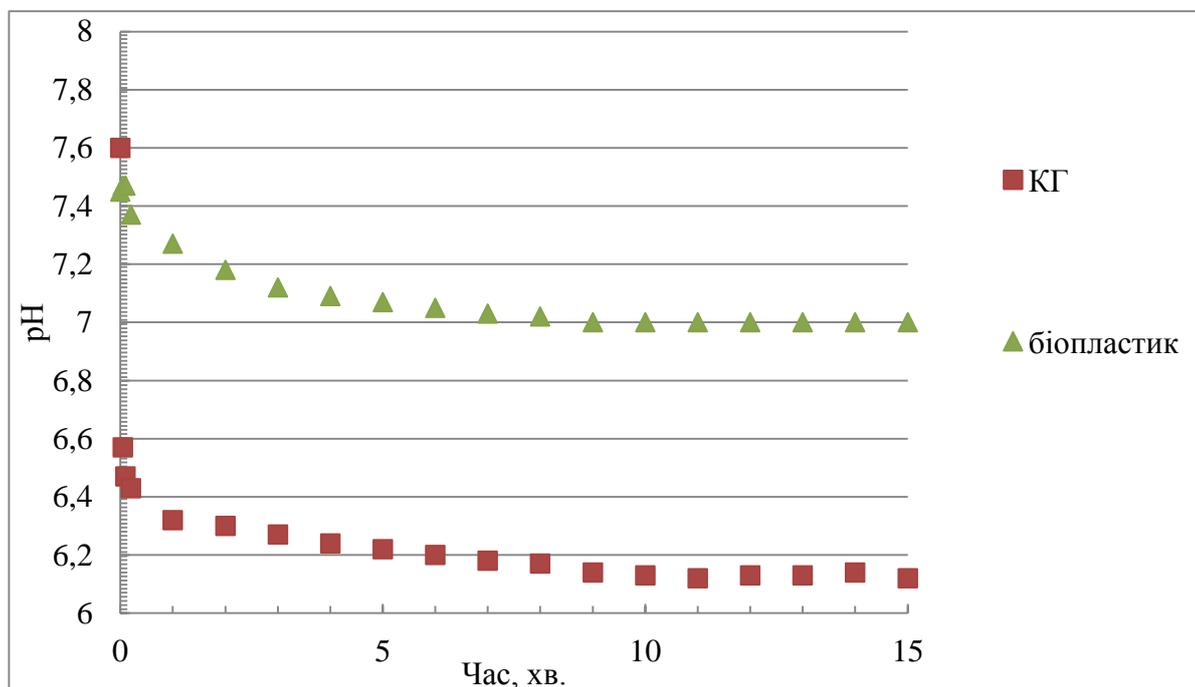


Рисунок 2 – Результати дослідження кислотно-основних поверхневих властивостей КГ та термопластичного біопластику марки GEMABIO F

Таблиця 1 – Результати експериментального визначення інтегральної (загальної) кислотності поверхні КГ та термопластичного біопластику марки GEMABIO F

Матеріал	pH_0	$pH_{сусп.}^p$	$pH_{ПГ}$	Час встановлення рівноважного стану, с
Термопластичний біопластик марки GEMABIO F	7,43	7,08	7,35	245
Кавова гуща	7,59	6,30	6,47	58

Показано, що поверхня термопластичного біопластику марки GEMABIO F має характер близький до нейтрального зі слабо-основною силою активних центрів $pK_a \approx 7,08-7,36$, поверхня кавової гущі має характер також близький до нейтрального зі слабо-кислотною силою активних центрів $pK_a \approx 6,30-6,47$.

Спектр FTIR КГ, показаний на рис. 5, демонструє широкий та складний діапазон смуг поглинання, що відповідають гетерогенному біохімічному складу матеріалу. Широка смуга з центром при 3336 см^{-1} пояснюється валентними коливаннями O–H від між- та внутрішньомолекулярних водневих зв'язків, головним чином пов'язаних з полісахаридами, такими як целюлоза та геміцелюлоза, а також фенольними гідроксильними групами в лігніні.

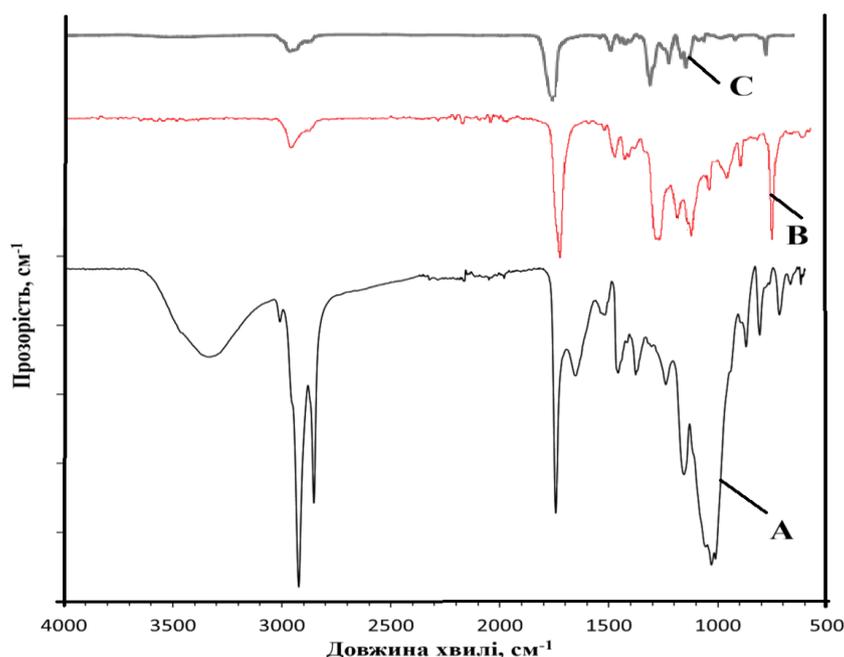


Рисунок 3 – Спектри ATR-FTIR:

А – висушеної кавової гущі КГ, В – термопластичний біопластик марки GEMABIO F,
С – екологічно безпечних біодеградабельних композитів з вмістом 40 % мас. КГ

Слабка смуга при 3010 см^{-1} пов'язана з розтягом С–Н у цис-конфігурованих подвійних зв'язках (С–С), що зустрічаються в ненасичених жирних кислотах, таких як лінолева та олеїнова кислоти, присутніх в КГ. Поглинання при 2923 см^{-1} та 2854 см^{-1} відповідає валентним коливанням зв'язків С–Н в аліфатичних групах CH_2 , які характерні для структур жирних кислот. Чітко виражений пік поглинання при 1744 см^{-1} характерний для валентних коливань карбонільного С–О від естерних груп, зазвичай пов'язаних з ліпідними компонентами та іншими структурами на основі вуглеводнів. Поглинання при 1649 см^{-1} пояснюється валентними коливаннями С–С цис-олефінів (цис- RHC CHR) і також може відповідати валентним коливанням С–Н амідів I, характерним для білкових структур. Поглинання при 1456 см^{-1} пов'язане з деформаційними коливаннями С–Н в аліфатичних групах CH_2 та CH_3 , тоді як смуга при 1377 см^{-1} відповідає симетричному деформаційному коливанню С–Н в групах CH_2 , яке зазвичай приписується компонентам кавової олії. Смуга поглинання при 1240 см^{-1} пов'язана зі зв'язками С–О–С у целюлозі та може також включати валентні коливання С–О з функціональної групи О–С–О у геміцелюлозах. Смуга при 1029 см^{-1} виникає внаслідок валентних коливань С–О та С–С, а також коливань $\text{C}_6\text{H}_2\text{O}_6$, характерних для целюлозних структур. Поглинання при 808 см^{-1} свідчить про наявність ізомерів хлорогенової кислоти, а також деформаційного коливання С1–Н в арабінах та арабіногалактанах у матриці геміцелюлози. Сигнал при 718 см^{-1} є результатом перекриття аліфатичних коливань CH_2 та позаплощинних деформацій цис-дизаміщених олефінів, які зазвичай зустрічаються в компонентах кавової олії. Загалом, дані ІЧ-спектроскопії з Фур'є підтверджують наявність кількох функціональних груп, включаючи гідроксильні, карбонільні та ефірні зв'язки, які відображають вміст целюлози, геміцелюлози, лігніну, жиру та білка у відпрацьованій кавовій гущі. Важливо зазначити, що склад сушеної КГ піддається природній мінливості через відмінності в походженні кави, типі зерен, рівні обсмажування та умовах заварювання.

Така мінливість може впливати на відносну кількість лігноцелюлозних та ліпідних компонентів, потенційно впливаючи на взаємодію наповнювач-матриця, термічну стабільність та поглинання вологи. Хоча в нашому дослідженні використовувалася одна промислово виготовлена партія КГ для забезпечення експериментальної узгодженості, майбутні дослідження можуть розглянути питання про те, як походження та обробка кави впливають на характеристики та відтворюваність композиту. ІЧ спектри КГ та термопластичного біопластику марки GEMABIO F показують функціональні групи, пов'язані з обома матеріалами. КГ вносить піки від гідроксильних О-Н та С-Н зв'язків в області 2800–3600 см⁻¹, а етерні групи (від залишкових олій) близько 1740 см⁻¹. Для термопластичного біопластику марки GEMABIO F характерні піки, такі як етерні зв'язки С-О та ароматичні С-Н валентні зв'язки. У екологічно безпечних біодеградабельних композитах з вмістом 40 % мас. КГ ці піки видимі, причому інтенсивність піків, пов'язаних з КГ, зростає з кількістю використаної КГ. Фактично ІЧ-спектр екологічно безпечних біодеградабельних композитів показують комбінацію піків обох компонентів.

Було досліджено оптимізовані склади екологічно безпечних біодеградабельних композитів: термопластичний біопластик марки GEMABIO F - КГ у наступних співвідношеннях, % мас.:

- 60 % мас. термопластичний біопластик марки GEMABIO F та 40 % мас. КГ – БПК1;
- 40 % мас. термопластичний біопластик марки GEMABIO F та 60 % мас. КГ – БПК2;
- 20 % мас. термопластичний біопластик марки GEMABIO F та 80 % мас. КГ – БПК3.

При поєднанні компоненти ретельно перемішувалися та перед загрузкою до бункера лабораторного екструдера. Технологічно екологічно безпечні біодеградабельні композити перероблялися без особливостей за винятком фази завантаження, яка відбувалася порційне, аби не було зсипання дрібної фракції КГ в зону загрузки екструдера та розділення суміші – термопластичний біопластик марки GEMABIO F та КГ під впливом вібрацій, які утворюються під час роботи екструдера та діють на його бункер. Зі знімків можна визначити здатність наповнювача розподілятися в полімерній матриці по зовнішньому вигляду поверхні зразків. У складі екологічно безпечних біодеградабельних композитів БПК1 привалює полімерна матриця. На поверхні зразка БПК1 візуально виділяється невелика кількість чорних вкраплень КГ, це вказує на те, що наповнювач добре диспергувався в полімерній матриці та його кількість можна збільшити. Зі збільшенням кількості КГ до 60 % мас. спостерігається зміння зовнішнього вигляду екологічно безпечних біодеградабельних композитів зі зміною кольору з сірого на темно коричневий та збільшення дисперсної фази КГ на поверхні зразка. За візуальними спостереженнями можна визначити перехід від середньонаповненого екологічно безпечного біодеградабельного композиту БПК1 до високонаповненого екологічно безпечного біодеградабельного композиту БПК2.

У результаті дослідження впливу вмісту КГ на комплекс технологічних характеристик екологічно безпечних біодеградабельних композитів відбувається зниження ПТР і густини та підвищення температури топлення при збільшенні вмісту КГ – таблиця 2.

Дійсно, модифікація термопластичного біопластику марки GEMABIO F КГ дозволяє підвищити комплекс його технологічних характеристик та здатність до переробки традиційними методами для термопластів: екструзія, лиття під тиском тощо. Це до-

зволяє рекомендувати їх для переробки на вироби для пакування та тари харчових та нехарчових продуктів: лотки, бокси, стакани, контейнери та т.п.

Таблиця 2 – Впливу вмісту КГ на комплекс технологічних характеристик екологічно безпечних біодеградабельних композитів

Композит	Міцнісні показники	
БПК1	ППР, г/10 хв.	3,5±0,1
	Густина, г/см ³	1,341±0,1
	Температура топлення, °С	150±0,1
БПК2	ППР, г/10 хв.	2,5±0,1
	Густина, г/см ³	1,309±0,1
	Температура топлення, °С	160±0,1
БПК3	ППР, г/10 хв.	2,1±0,1
	Густина, г/см ³	1,259±0,1
	Температура топлення, °С	165±0,1

Висновки. В огляді показано, що агломерати з відходів ПА6 демонструють значне зниження властивостей при повторній переробці, однак ці властивості можуть бути ефективно компенсовані за допомогою армування, введення компабілізаторів або біоінсперована модифікація. Найкращі результати з методів модифікації агломератів ПА6 досягнуто при використанні коротких вуглецевих волокон з компабілізаторами, натуральних волокон для екологічно чистих композитів, нанодобавок і реактивних сумішей для стабілізації фаз та біоінспірованих структур відкриваються перспективи для створення матеріалів із низькою варіативністю та стабільними експлуатаційними характеристиками. Розглянуто авторський метод модифікації агломерату відходів ПА6 гуміновими речовинами та мастербатчем. Встановлено, що найкращим є агломерат відходів ПА6 зі вмістом гумінових речовин на рівні 0,5 % мас. та мастербатчу MW-PA CB10 на рівні 2 % мас. Для цього складу ударна в'язкість становить 43,5 кДж/см² та руйнівна напруга при вигині – 126,4 МПа. Саме такий склад агломерату ПА6 можна рекомендувати для повторного використання в традиційних галузях первинного поліаміду-6 для отримання інженерно-технічної продукції.

Література

1. Lebreton L., Andrady A. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Communications*. 2019. Vol. 5. No. 1. P. 1–11.
2. Houssini K., Li J., Tan Q. Complexities of the global plastics supply chain revealed in a trade-linked material flow analysis. *Communications Earth & Environment*. 2025. Vol. 6. No. 1. P. 257.
3. Tilsted J. P. Ending fossil-based growth: confronting the political economy of petrochemical plastics. *One Earth*. 2023. Vol. 6. No. 6. P. 607–619.
4. Shen M. (Micro) plastic crisis: un-ignorable contribution to global greenhouse gas emissions and climate change. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 254. P. 120138.

5. Zhao X., Cornish K., Vodovotz Y. Narrowing the gap for bioplastic use in food packaging: an update. *Environmental science & technology*. 2020. Vol. 54. No. 8. P. 4712–4732.
6. Supri S., Felicia W. X. L., Affandy M. A. M., Padam B. S., Prihanto A. A., Rovina K. Macroalgae-Based Bio-Based Packaging: characteristics, green extraction methods, and applications as sustainable solutions. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*. 2025. Vol. 15. No.1. P. 249–266.
7. Samir A., Ashour F. H., Hakim A., Bassyouni M. Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications. *Npj Materials Degradation*. 2022. Vol. 6. No. 1.
8. de Bomfim A. S. C. et al. Effect of spent coffee grounds on the crystallinity and viscoelastic behavior of polylactic acid composites. *Polymers*. 2023. Vol. 15. No. 12. P. 2719.
9. Boey J. Y. et al. The effect of spent coffee ground (SCG) loading, matrix ratio and biological treatment of SCG on poly (hydroxybutyrate)(PHB)/poly (lactic acid)(PLA) polymer blend. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. Vol. 266. P. 131079.
10. Gaidukova G., Platnieks O., Aunins A., Barkane A., Ingrao C., Gaidukovs S. Spent coffee waste as a renewable source for the production of sustainable poly(butylene succinate) biocomposites from a circular economy perspective. *RSC Advances*. 2021. Vol. 11. P. 18580.
11. Tang L., Hou X., Wang J., Pan L. Effect of different chemical surface treatments on interfacial compatibility and properties of polyhydroxyalkanoates. Coffee Grounds Composites. *Polymer Composite*. 2023. Vol. 44. P. 1175–1187.
12. Alharbi M., Bairwan R. D., Rizg W. Y., Khalil H. A., Murshid S. S., Sindi A. M., Abdullah C. K. Enhancement of Spent Coffee Grounds as Biofiller in Biodegradable Polymer Composite for sustainable packaging. *Polymer Composite*. 2024. Vol. 45. P. 9317–9334.

Bibliography (transliterated)

1. Lebreton L., Andrady A. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Communications*. 2019. Vol. 5. No. 1. P. 1–11.
2. Houssini K., Li J., Tan Q. Complexities of the global plastics supply chain revealed in a trade-linked material flow analysis. *Communications Earth & Environment*. 2025. Vol. 6. No. 1. P. 257.
3. Tilsted J. P. Ending fossil-based growth: confronting the political economy of petrochemical plastics. *One Earth*. 2023. Vol. 6. No. 6. P. 607–619.
4. Shen M. (Micro) plastic crisis: un-ignorable contribution to global greenhouse gas emissions and climate change. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 254. P. 120138.
5. Zhao X., Cornish K., Vodovotz Y. Narrowing the gap for bioplastic use in food packaging: an update. *Environmental science & technology*. 2020. Vol. 54. No. 8. P. 4712–4732.
6. Supri S., Felicia W. X. L., Affandy M. A. M., Padam B. S., Prihanto A. A., Rovina K. Macroalgae-Based Bio-Based Packaging: characteristics, green extraction methods, and applications as sustainable solutions. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*. 2025. Vol. 15. No.1. P. 249–266.
7. Samir A., Ashour F. H., Hakim A., Bassyouni M. Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications. *Npj Materials Degradation*. 2022. Vol. 6. No. 1.

8. de Bomfim A. S. C. et al. Effect of spent coffee grounds on the crystallinity and viscoelastic behavior of polylactic acid composites. *Polymers*. 2023. Vol. 15. No. 12. P. 2719.

9. Boey J. Y. et al. The effect of spent coffee ground (SCG) loading, matrix ratio and biological treatment of SCG on poly (hydroxybutyrate)(PHB)/poly (lactic acid)(PLA) polymer blend. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. Vol. 266. P. 131079.

10. Gaidukova G., Platnieks O., Aunins A., Barkane A., Ingraio C., Gaidukovs S. Spent coffee waste as a renewable source for the production of sustainable poly(butylene succinate) biocomposites from a circular economy perspective. *RSC Advances*. 2021. Vol. 11. P. 18580.

11. Tang L., Hou X., Wang J., Pan L. Effect of different chemical surface treatments on interfacial compatibility and properties of polyhydroxyalkanoates. Coffee Grounds Composites. *Polymer Composite*. 2023. Vol. 44. P. 1175–1187.

12. Alharbi M., Bairwan R. D., Rizg W. Y., Khalil H. A., Murshid S. S., Sindi A. M., Abdullah C. K. Enhancement of Spent Coffee Grounds as Biofiller in Biodegradable Polymer Composite for sustainable packaging. *Polymer Composite*. 2024. Vol. 45. P. 9317–9334.

УДК 622.74

М. С. Кочетов, аспірант, Г. М. Черкашина, канд. техн. наук, доцент

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ БІОПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО БІОПЛАСТИКУ ТА ВІДПРАЦЬОВАНОЇ КАВОВОЇ ГУЩІ

Мета статті – дослідження екологічно безпечних біополімерних композитів на основі термопластичного біопластику та відпрацьованої кавової гущі. Об'єктами експериментального дослідження були волога кавова гуща з сортів Робусти та Арабіки у співвідношенні 50:50 мас. %, зібрані в 8 різних кав'ярнях «Аромакава» міста Харкова та термопластичний біопластик марки GEMABIO F (Gema Polimer Plastik Ürünleri San. ve Tic. A.S., Турція) на основі ПБАТ, який містить відновлювану сировину і має до 90 % вмісту вуглецю біопроходження. Вироби з GEMABIO повністю біорозкладні та компостуються залежно від товщини виробу. Густина біопластику складає $1,33 \text{ г/см}^3$ з індексом плинності розтопу (MFI) 2-4 г/10 хв ($190 \text{ }^\circ\text{C}$, 2,16 кг). Показано, що сучасний період розвитку полімерного матеріалознавства характеризується підвищеним науковим і комерційним інтересом до сумішевих матеріалів на основі відходів біопластиків та органічних наповнювачів внаслідок практично необмежених можливостей швидкого та економічно вигідного розширення їх асортименту під конкретне застосування. Було досліджено гранулометричний склад кавової гущі. Для цього кавову гущу просівали через розміри сит 400, 200 та 100 мкм. Фактично, для дослідженої кавової гущі, характерне унімодальність гранулометричного складу з максимумом при 200 мкм. З результатів морфологічних досліджень кавової гущі показано, що вона характеризується пластинчастою структурою частинок, а частинки усіх фракцій кавової гущі вкриті смоляними або маслянистими речовинами. Показано, що поверхня термопластичного біопластику марки GEMABIO F має характер близький до нейтрального зі слабо-основною силою

активних центрів $pK_a \approx 7,08-7,36$, поверхня кавової гущі має характер також близький до нейтрального зі слабо-кислотою силою активних центрів $pK_a \approx 6,30-6,47$. Встановлено, що модифікація термопластичного біопластику марки GEMABIO F КГ дозволяє підвищити комплекс його технологічних характеристик та здатність до переробки традиційними методами для термопластів (екструзія, лиття під тиском та ін.) в виробі для пакування та тари харчових та нехарчових продуктів: лотки, бокси, стакани, контейнери та т.п.

Ключові слова: екологія, безпека, біополімери, композити, термопластичність, кавова гуща.

M. S. Kochetov, A. M. Cherkashina

RESEARCH OF ENVIRONMENTALLY SAFE BIOPOLYMER COMPOSITES BASED ON THERMOPLASTIC BIOPLASTICS AND WASTED COFFEE GROUNDS

The purpose of the article is to study environmentally safe biopolymer composites based on thermoplastic bioplastics and used coffee grounds. The objects of the experimental study were wet coffee grounds from Robusta and Arabica varieties in a ratio of 50:50 by mass. %, collected in 8 different coffee shops "Aromakawa" in the city of Kharkiv and thermoplastic bioplastic brand GEMABIO F (Gema Polimer Plastik Ürünleri San. ve Tic. A.S., Turkey) based on PBAT, which contains renewable raw materials and has up to 90 % of carbon content of bio-origin. Products made of GEMABIO are fully biodegradable and compostable depending on the thickness of the product. The density of the bioplastic is 1.33 g/cm^3 with a melt flow index (MFI) of 2–4 g/10 min (190 °C, 2.16 kg). It is shown that the modern period of development of polymer materials science is characterized by increased scientific and commercial interest in composite materials based on bioplastic waste and organic fillers due to the practically unlimited possibilities of rapid and economically profitable expansion of their range for specific applications. The granulometric composition of coffee grounds was investigated. For this purpose, the coffee grounds were sieved through sieve sizes of 400, 200 and 100 μm . In fact, the studied coffee grounds are characterized by unimodality of the granulometric composition with a maximum at 200 μm . The results of morphological studies of coffee grounds show that it is characterized by a lamellar structure of particles, and the particles of all fractions of coffee grounds are covered with resinous or oily substances. It is shown that the surface of the thermoplastic bioplastic of the GEMABIO F brand has a character close to neutral with a weakly basic strength of active centers $pK_a \approx 7.08-7.36$, the surface of coffee grounds also has a character close to neutral with a weakly acidic strength of active centers $pK_a \approx 6.30-6.47$. It has been established that the modification of thermoplastic bioplastic of the GEMABIO F KG brand allows to increase the complex of its technological characteristics and the ability to be processed by traditional methods for thermoplastics (extrusion, injection molding, etc.) for processing into products for packaging and containers of food and non-food products: trays, boxes, glasses, containers, etc.

Keywords: environmentally safe, biopolymer, composites, thermoplastic processed, coffee grounds.