УДК 502.174.1
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.6-69.4

ЕКОЛОГІЗАЦІЯ ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ БАГАТОШАРОВОГО ПОЛІМЕРНОГО ПАКУВАННЯ В КОНТЕКСТІ РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

Титаренко А.І. (orcid.org/0009-0009-1609-4500),
Макєєв П.В. (orcid.org/0009-0000-0604-1282)
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова,2, 61002, м. Харків
Andrii.Tytarenko@mit.khpi.edu.ua, Pavlo.Makieiev@mit.khpi.edu.ua

Багатошарові полімерні відходи пакування типу «дой-пак» були досліджені з точки зору термічних, механічних та хімічних методів переробки. Цей пакувальний матеріал базується на складних багатокомпонентних структурах з кількох полімерних шарів, алюмінієвої фольги, друкарських фарб та інших адгезивів, що ускладнює розділення відходів та їх утилізацію чи повторне використання. Відходи пакування, використані в цьому дослідженні, містили деякі полімери (кетчуп, згущене молоко, побутова хімія тощо). Були проведені спалювання полімерного компонента, подрібнення разом з електростатичною сепарацією, обробка азотною кислотою та переробка на установці шнекового піролізу. Мікроскопічні методи були застосовані для аналізу морфології отриманого продукту та рівнів його забруднення різними фракціями. Спалювання зменшує фрагменти алюмінієвої фольги, кількість продуктів термічного розкладу та забруднювачів, присутніх на поверхні, залишається, зменшення яких могло бути досягнуто лише після ультразвукового очищення. Подрібнення з подальшою електростатичною сепарацією призводить до утворення полімерних та алюмінієвмісних фракцій; і не дозволяє повністю розділити компонентні шари. Азотна кислота сприяє руйнуванню адгезивного шару, але потребує додаткової механічної дії для розшарування, при цьому гази та стічні води потребують уваги. Шляхом піролізу в поєднанні з низькотемпературним спіканням були виготовлені тверді речовини різної структури, що складаються з вуглецевмісних елементів, шматочків полімерної фольги та металевих елементів тощо. Було виявлено, що розглянуті методи виявляють різну технічну здійсненність та обмеження, так що ефективне управління відходами вимагає кількісної оцінки виходів, чистоти та призначення для подальшого застосування отриманих матеріалів. *Ключові слова:* багатошарове пакування, полімерні відходи, термічна переробка, механічна переробка, хімічна переробка, піроліз.

Environmentally sustainable management of multilayer polymer packaging waste in the context of resource conservation. Tytarenko A., Makieiev P.

Recycling of multilayer polymer packaging (stand-up pouches [Doypack]) employing thermal, mechanical and chemical methods is the issue addressed in the article. Packaging construction is complex - polymer layers, aluminum foil, printing coverages and adhesives prevent materials separation and reuse. Waste left as a result of manufacture of ketchup, condensed milk and other foodstuffs and household chemicals packaging was used in the experiments. Thermal polymer layers removal, followed by mechanical shredding and electrostatic separation, nitric acid treatment as well as pyrolysis in a screw pyrolysis unit were used as proposed recycling steps.

The morphology of fractions was evaluated with microscope. Thermally treated fragments of aluminum foil resulted in polymer decomposition residues of different degree that still remained on the fragments' surfaces. An influence of ultrasonic cleaning for removing visible contamination was negligible. Employing shredding and electrostatic separation gave fractions rich in polymers and enriched in aluminum, still both were contaminated with inclusions when analyzed with microscope. Under the treatment of nitric acid adhesive bonds were disturbed, though separation of layers must be completed with mechanical method of processing. When applied on industrial scale gas emissions and used solutions of nitric acid should be considered. With pyrolysis and low-temperature sintering heterogeneous mixtures of solids with different amounts of carbonaceous formations, fragments of polymers and metals were obtained. Results show, that at given conditions none of the suggested methods result in completely solving the problem of recycling multilayer packaging since they still do not fully separate its components. Further work must be done including determination of yield of the products, purity of produced fractions, aluminum losses and areas of possible application of the recyclates. *Key words*: multilayer packaging, polymer waste, thermal recycling, mechanical recycling, chemical recycling, pyrolysis.

Актуальність дослідження. Багатошарова гнучка полімерна упаковка є одним із найбільш поширених видів пакувальних матеріалів для харчових, фармацевтичних та побутових товарів [1]. Особливе місце серед неї займає упаковка типу дой-пак (Doypack). Конструктивною особливістю такої упаковки є гнучкий багатошаровий матеріал із донною складкою, що забезпечує стійке вертикальне положення упаковки. Такий формат широко застосовується для пакування (консервування) харчових продуктів – кави, чаю, снеків, кормів для тварин, соусів, кондитерських виробів, косметичних та побутових продуктів [2]. Конструкція дой-пак може містити від декількох до багатьох функціональних шарів, які сформовані з різних полімерів, металізованих плівок, алюмінієвої фольги, паперу, бар'єрних матеріалів, друкованих шарів та адгезивів[3, 4].

© Титаренко А.І., Макєєв П.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Застосування багатошарових структур зумовлене необхідністю одночасного забезпечення механічної міцності, герметичності та бар'єрних властивостей (відносно кисню та водяної пари, захист від світлата продовження терміну його придатності) [5]. У багатошаровій упаковці різні матеріали виконують різні функції. Наприклад, поліетилен та поліпропілен формують герметичні та вологостійкі шари, а поліамід забезпечує механічну міцність, поліетилен терефталат відповідає за структурні та бар'єрні властивості [6]. Подібна функціональна спеціалізація шарів є важливою на етапі виробництва упаковки. Проте вона суттєво ускладнює її переробку після завершення життєвого циклу.

Основна проблема полягає в тому, що дой-пак – це не один полімерний матеріал, а складова несумісних полімерів, які з'єднані адгезивами. Отже, подрібнення та повторне плавлення такої упаковки не забезпечує отримання однорідного вторинного полімеру.

Порівняно з традиційною упаковкою з тими ж функціями, гнучка багатошарова пластикова упаковка характеризується нижчим споживанням енергії у виробництві та зменшеною вагою упаковки [8]. Таким чином, проведення досліджень у даному напрямі є актуальним і спрямоване на визначення найбільш ефективних технологічних підходів до переробки багатошарової полімерної упаковкитипу дой-пак.

Метою роботи було дослідження можливості переробки складного пакування «Дой-пак» з використанням термічних, механічних та хімічних методів розділення. Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

– дослідити можливості термічного обробки відходів для вилучення алюмінієвої плівки;

– дослідити результати механічних методів підготовки відходів до подальшої переробки;

– проаналізувати ефективність методу розділення компонентів багатошарового пакування з використанням азотної кислоти;

– оцінити можливості переробки відходів за допомогою піролізної установки.

Таким чином, проведення досліджень у даному напрямі є актуальним і спрямоване навизначення найбільш ефективних технологічних підходів до переробки багатошарової полімерної упаковкитипу дой-пак.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Багатокомпонентний склад складної упаковки суттєво ускладнює її переробку після завершення строку використання. Автори роботи [9] встановили можливість переробки багатошарової упаковки з друкованими покриттями на основі поліуретанових фарб. Авторами було запропоновано використання технології селективного розчинення та осадження полімерів. Такий підхід передбачає послідовне вилучення окремих полімерних компонентів. Альтернативним напрямом є хімічне перетворення їх складових на вторинні продукти. В роботі [10] було досліджено можливість переробки двошарової плівки на основі лінійного поліетилену низької щільності та поліетилентерефталату. Авторами було використано метод послідовного гідротермального зрідження. Дана технологія передбачає проведення двох послідовних стадій, що дають змогу окремо переробляти компоненти плівки.

В дослідженні [11] проведено техніко-економічне й екологічне оцінювання пілотної системи переробки таких відходів. Автори розглянули чотири можливі напрями використання вторинної сировини (виготовлення покрівельних плит, пластикових гранул, піддонів і плівкових матеріалів). Результати дослідження дають змогу оцінити потенційні сфери застосування переробленої упаковки.

В роботі [12] було продемонстровано вплив попередньої модифікації поверхні відходів багатошарової гнучкої упаковки на процес їх деламінації.

Однак навіть після механічного розділення або подрібнення багатошарової упаковки отримані полімерні компоненти не завжди можуть бути використані повторно без додаткової обробки. Це пов'язано з відмінностями в їхній хімічній будові та температурних характеристиках.

Зокрема, автори [13] дослідили можливість підвищення якості вторинного матеріалу, отриманого з багатошарових плівок на основі поліетилену та поліаміду, шляхом введення сумісника – поліізопрену, модифікованого малеїновим ангідридом (PI-g-MA). Дослідження було спрямоване на зменшення негативного впливу несумісності полімерних фаз під час механічного рециклінгу. Встановлено, що введення 1,5 % сумісника забезпечувало найкращі результати за показниками механічних властивостей і стійкості до ударного навантаження серед досліджених складів.

Питання якості вторинної сировини було розглянуто в роботі [14]. Була встановлена можливість деламінації відходів багатошарової харчової упаковки з використанням азотної кислоти та оцінили механічні властивості вилучених полімерних матеріалів. Автори встановили, що отримані зразки відрізнялися за міцністю під час руйнування та показниками міцності на розтяг. Результати демонструють, що відновлення полімерів із багатошарової упаковки не гарантує отримання матеріалу з однаковими властивостями, а його подальше застосування має визначатися результатами експериментального оцінювання.

Узагальнений аналіз сучасних підходів до переробки багатошарової упаковки наведено в оглядовій роботі [15]. Автори систематизували основні технологічні проблеми рециклінгу багатошарових упаковок та розглянули наявні альтернативи та перспективи їх подальшого вдосконалення. Особливу увагу приділено складності розділення полімерних шарів,

обмеженням традиційної механічної переробки та необхідності розроблення технологічних рішень.

Таким чином, аналіз наукових праць [9–15] свідчить про наявність декількох перспективних напрямів переробки багатошарової полімерної упаковки. До них можна віднести селективне розчинення й осадження полімерів, хімічне перетворення компонентів, інтенсифікацію деламінації та механічного рециклінгу із застосуванням сумісників.

Матеріали та методи дослідження

Для дослідження використовували відходи виробництва багатошарового пакування кетчупу, згущеного молока, побутової хімії та інших продуктів (рис. 1).

На першому етапі досліджували продукти випалювання пакування на пічній установці, наведеній на рис. 2, яка складалась з обертаючого двигуном барабану (рис. 2а), в який поміщали відходи, герметичного корпусу з димовою трубою (рис. 2б) та горілки (рис. 2в), яка випалювала горючу частину складної упаковки.

На другому етапі досліджували результати переробки пакування механічними методами на лінії переробки, наведеної на рис. 3.

Лінія оснащена подрібнюючим устаткуванням (дробарка, млин) та електростатичного сепаратора, в якому відбувається розділення на метали та пластики подрібнених відходів.



Рис. 1. Зовнішній вигляд відходів багатошарового пакування



а *б* *в*

Рис. 2. Установка для випалювання полімерної складової



Рис. 3. Лінія переробки алюмовмісних відходів

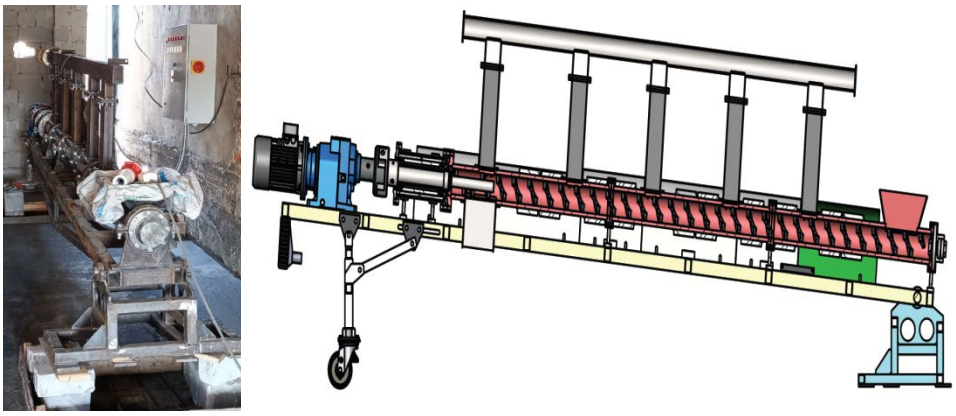

Рис. 4. Шнекова установка для піролізу

На наступному етапі розглядали можливість розділення багатошарового пакування на складові з використанням азотної кислоти.

На завершальному етапі досліджували ефективність переробки відходів на шнековій піроліз ній установці (рис. 4).

Шнекова пролізна установка призначена для перероблення попередньо подрібнених органічних полімерних матеріалів шляхом їх нагрівання та механічного перемішування безпосередньо в робочій порожнині шнекового реактора. У результаті термічного розкладання сировини утворюються піролізний вуглецевий залишок і газоподібні продукти, що дає змогу зменшити обсяг відходів, які потребують подальшого видалення. Основним цільовим продуктом роботи установки є піролізний вуглець, тоді як утворений піролізний газ розглядається як побічний енергетичний ресурс, який передбачено використовувати для забезпечення теплових потреб процесу шляхом спалювання в суміші з природним газом. Конструктивною основою піролізної лінії є шнековий конвеєр із можливістю частотного регулювання швидкості обертання приводного вала мотор-редуктора.

В ході експериментів були отримані продукти вторинної сировини та проаналізовані за допомогою мікроскопічних методів.

Результати дослідження та їх обговорення

Дослідження способу випалювання відходів для вилучення алюмінієвої плівки. В результаті випалювання полімерної складової багатошарової упаковки, відходів пофарбованої фольги виробництва йогуртів та інших алюмінієвовмісних пакувальних відходів на установці, зображеній на рис. 1 були отримані продукти – зола та алюмінієва фольга, наведені на рис. 5.

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Твердий залишок представлений золою, що складається з частинок різного розміру, в яких зустрічаються залишки фольги розміром від 0,1 до 2 мм. Алюмінієва фольга після випалювання полімерного шару зберігає металеву основу, проте має деформовану поверхню та містить на поверхні залишки продуктів термічного розкладання полімерів, фарби та оксидну плівку. Для видалення цих залишків фольгу додатково обробляли ультразвуком в ультрозвуковій ванні. Після очищення на поверхні металу спостерігається зменшення кількості видимих забруднень. Проведені дослідження показують, що термічне обробки дає змогу видалити значну частину полімерної складової та отримати алюмінієвий залишок, придатний до подальшого очищення та утилізації.

Дослідження продуктів механічної підготовки відходів до подальшої переробки

В результаті розділення багатошарового пакування на лінії (рис. 2) були отримані наступні продукти: подрібнене пакування, порошок алюмінію та полімерна складова (рис. 6).

На фотографії (рис. 6) наведено подрібнено полімерну фракцію й алюмінієвмісний матеріал. Мікроскопічні зображення демонструють морфологію обох фракцій: у полімерній складовій спостерігаються фрагменти плівки з залишками друкованого покриття, а алюмінієва складова здебільшого представлена металевими частинками різної форми та розмірів. Водночас на мікрофотографіях помітні окремі ділянки, де полімерний матеріал залишається

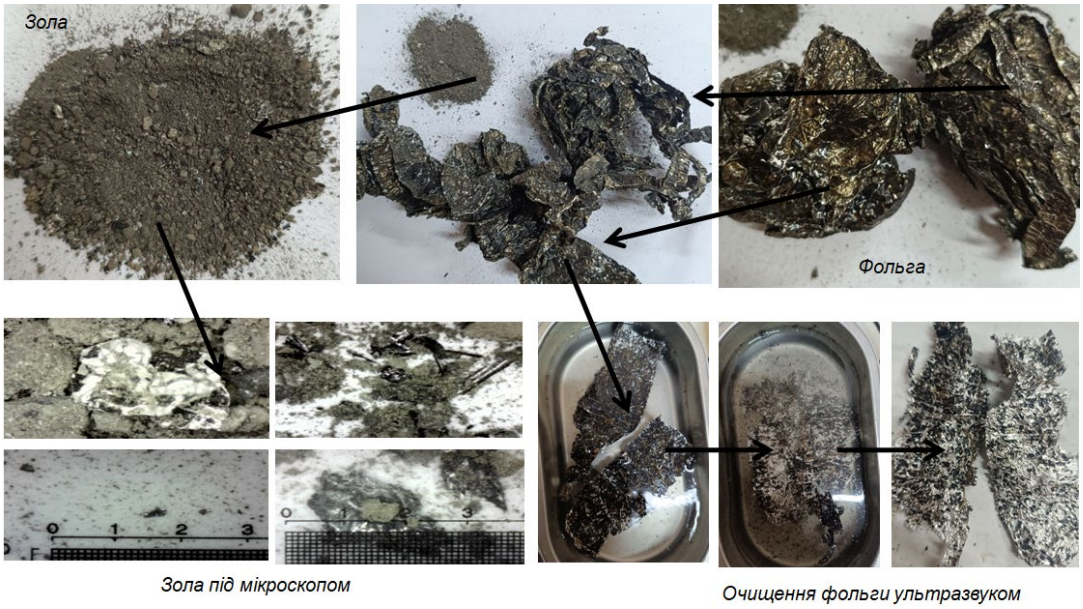

Рис. 5. Продукти випалювання багатошарового пакування: зола, фрагменти фольги до та після ультразвукового очищення і мікроскопічні зображення золи



Рис. 6 Продукти механічного подрібнення та електростатичної сепарації багатошарового пакування

на поверхні металевих частинок або металеві включення присутні в полімерній фракції. Це вказує на неповне розділення компонентів і необхідність оцінювання чистоти отриманих фракцій. Для подальшої переробки алюмінієву фракцію бажано очистити від залишків полімерних часток, наприклад випалюванням або хімічними методами.

Дослідження методу розділення компонентів багатошарового пакування з використанням азотної кислоти

На наступному етапі механічно подрібнений матеріал та окремі частинки дойпаку обробляли азотною кислотою для визначення можливості їх розділення.

На фотографіях представлені вихідні зразки, процес їх обробки, а також матеріали після відфільтровування реакційної суміші. Мікроскопічні зображення дають змогу розглянути структуру полімерних і металевмісних фрагментів після взаємодії з азотною кислотою. Кислота руйнує клеєві суміші і дозволяє розділити всі шари. Однак, на поверхні полімерних частинок помітні залишки покриттів та окремі металеві включення. Слід також відмітити, що для відділення полімерної складової від алюмінію потрібно докладати фізичних зусиль. Тому після обробки кислотою, промивки і нейтралізації відходів доцільно буде здійснювати подрібнення та сепарацію. Використання азотної кислоти супроводжується виділенням під час реакції парів і газів, тому для реалізації цього методу в промислових умовах потрібно детальне дослідження цього процесу та його економічної доцільності.

Переробка відходів багатошарового пакування за допомогою шнекової піролізної установки

На рис. 7 наведено результати переробки некласифікованих відходів пакування у шнековій піролізній установці (рис. 4) та їх низькотемпературного спікання. У верхній частині рисунка показано процес піролізу плівкових матеріалів і багатошарового пакування, а також отримані тверді залишки неправильної форми з темним забарвленням і неоднорідною поверхнею. Мікроскопічні зображення цих зразків відображають їхню неоднорідну структуру та наявність частинок та вкраплень різного розміру. Піролізний залишок після руйнування полімерів при подальшому дослідженні може бути використаний як компонент паливних сумішей, сировина для вуглецевмісних матеріалів або мінерально-вуглецевий наповнювач.

У нижній частині рисунка представлено результати низькотемпературного спікання багатошарового пакування. Отриманий матеріал має вигляд ущільненого твердого залишку, у структурі якого зберігаються металеві та полімерні фрагменти. На мікрофотографіях помітні багатошарова будова вихідного матеріалу, залишки кольорових полімерних покриттів і металеві включення. Такий продукт може бути об'єктом досліджень для виготовлення технічних виробів, наповнювачів або композиційних матеріалів.

Висновки за результатами дослідження

1. Досліджено термічне обробки відходів багатошарового пакування з метою вилучення алюмінієвої фольги. Після випалювання полімерної складо-

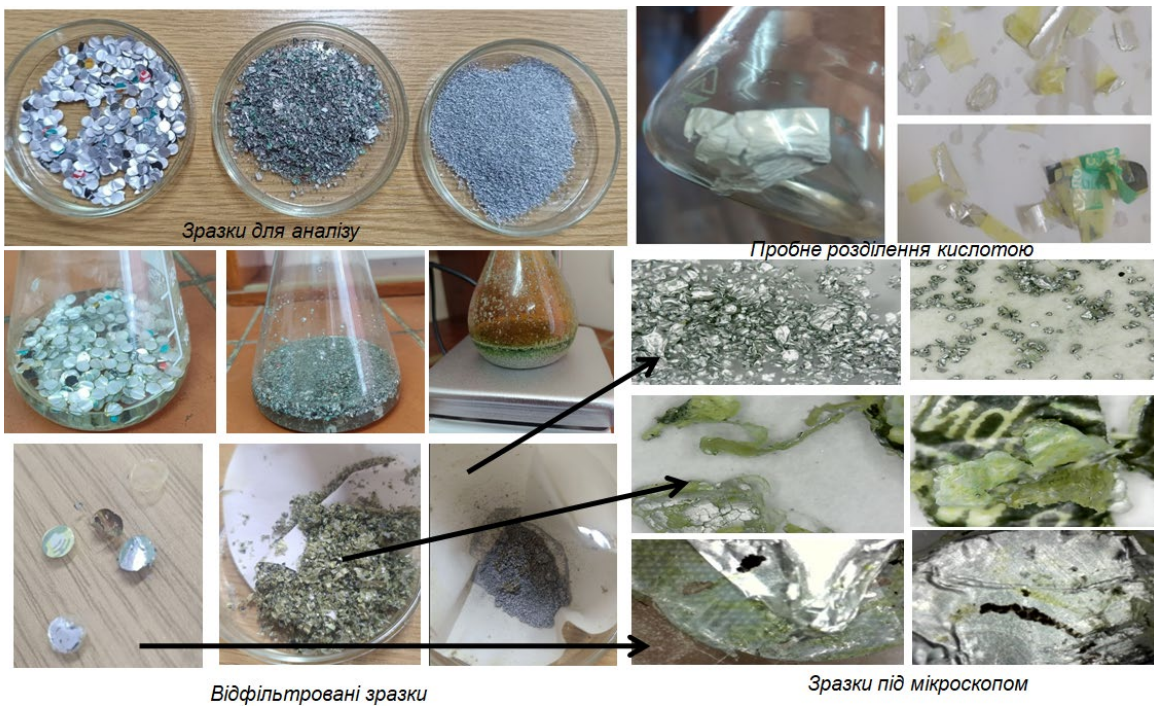

Рис. 7. Результати розділення компонентів багатошарового пакування азотною кислотою

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

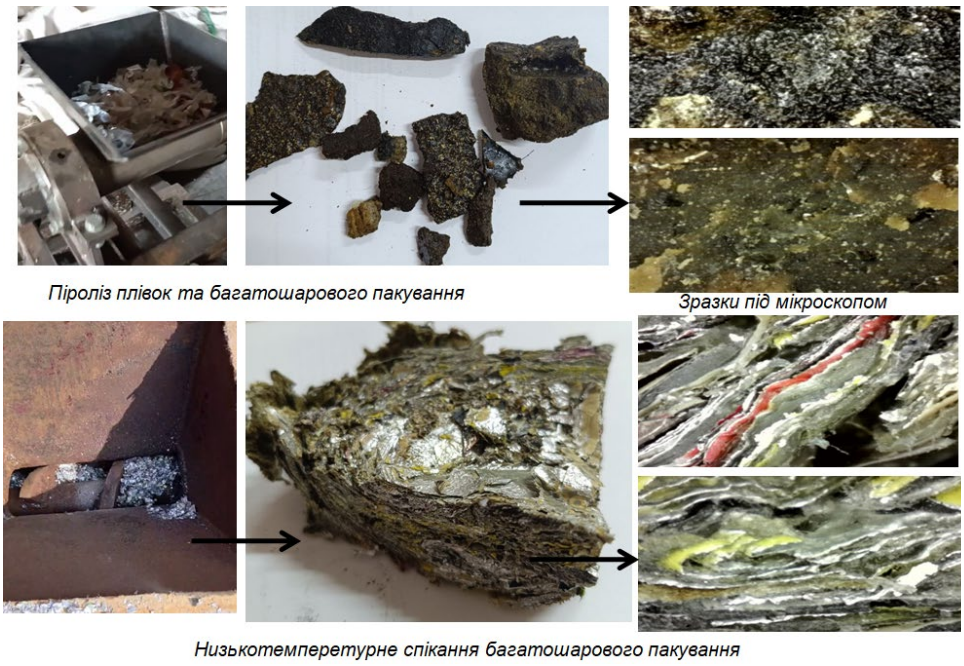

Рис. 8. Тверді продукти термічного обробки відходів багатошарового пакування у шнековій піролізній установці

вої отримано твердий залишок і фрагменти фольги, на поверхні яких зберігалися продукти термічного розкладання. Додаткове ультразвукове очищення зменшило кількість видимих забруднень. Отримані результати свідчать про можливість використання термічного обробки для видалення полімерного шару та підготовки алюмінієвої складової до подальшого використання та переробки.

2. Під час механічного подрібнення та електростатичної сепарації багатошарових відходів отримано полімерну й алюмінієвмісну складові. Дослідження зразків під мікроскопом виявило, що розділення не є повним: у металевмісному матеріалі залишаються полімерні включення, а в полімерній фракції трапляються частинки металу. Це свідчить про необхідність удосконалення режимів подрібнення та сепарації для підвищення чистоти отриманих компонентів, що досить складно на промислових лініях такого типу.

3. Досліджено обробки зразків відходів азотною кислотою. Після обробки та фільтрування отримано тверді залишки, у яких зберігалися металеві й полімерні фрагменти. Проте ці фрагменти легко відділяються при механічному впливі. Під час вибору умов обробки також слід враховувати витрати кислоти й необхідність поводження з відпрацьованим розчином.

4. Досліджено можливості переробки відходів у шнековій піролізній установці в процесі низькотемпературного спікання та високотемпературного піролізу. Після обробки отримано тверді залишки неоднорідної структури, у яких спостерігаються вуглецевмісні утворення, металеві включення та фрагменти полімерного походження.

Загальний висновок

Проведене дослідження показало, що перероблення відходів багатошарового пакування типу «дой-пак» можливе із застосуванням термічних, механічних і хімічних методів, проте кожен із них має свої обмеження. Термічне обробки дає змогу видалити полімерну складову та отримати фрагменти алюмінієвої фольги, механічне подрібнення й електростатична сепарація забезпечують розділення матеріалу на окремі фракції, а кислотне обробки потребує додаткової перевірки повноти розділення та втрат металу. Піроліз відкриває можливість перетворення полімерної складової на газоподібні, рідкі й тверді продукти. Подальші дослідження доцільно зосередити на кількісному оцінюванні виходу та чистоти отриманих матеріалів, визначенні втрат алюмінію й встановленні можливостей використання отриманих в процесі переробки продуктів.

Література

1. Chen X., Kroell N., Wickel J., Feil A. Determining the composition of post-consumer flexible multilayer plastic packaging with near-infrared spectroscopy. *Waste Management*. 2021. Vol. 123. P. 33–41. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.015.
2. Seier M., Archodoulaki V.-M., Koch T., Duscher B., Gahleitner M. Prospects for Recyclable Multilayer Packaging: A Case Study. *Polymers.* 2023. Vol. 15, No. 13. Art. 2966. DOI: https://doi.org/10.3390/polym15132966.

3. Borysovska O., Bovsunovsky V. Recycling of multilayer polymer packaging doypack. *Collection of Research Papers of the National Mining University.* 2022. No. 70. P. 171–181. DOI: https://doi.org/10.33271/crpnmu/70.171.
4. Adam H. B., Yousfi M., Maazouz A., Lamnawar K. Recycling of Multilayer Polymeric Barrier Films: an Overview of Recent Pioneering Works and Main Challenges. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2025. Vol. 310, No. 7. Art. 2400414. DOI: https://doi.org/10.1002/mame.202400414.
5. Schmidt J., Grau L., Auer M., Maletz R., Woidasky J. Multilayer Packaging in a Circular Economy. *Polymers.* 2022. Vol. 14, No. 9. Art. 1825. DOI: https://doi.org/10.3390/polym14091825.
6. Soares C. T. de M., Ek M., Östmark E., Gällstedt M., Karlsson S. Recycling of multi-material multilayer plastic packaging: Current trends and future scenarios. *Resources, Conservation and Recycling.* 2022. Vol. 176. Art. 105905. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105905.
7. Lisiecki M., Belé T. G. A., Ügdüler S., Fiorio R., Astrup T. F., De Meester S., Ragaert K. Mechanical recycling of printed flexible plastic packaging: The role of binders and pigments. *Journal of Hazardous Materials.* 2024. Vol. 472. Art. 134375. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134375.
8. Georgiopoulou I., Pappa G. D., Vouyiouka S. N., Magoulas K. Recycling of post-consumer multilayer Tetra Pak® packaging with the Selective Dissolution-Precipitation process. Resources, *Conservation and Recycling.* 2021. Vol. 165. Art. 105268. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105268.
9. Sánchez-Rivera K. L., Munguía-López A. del C., Zhou P., Cecon V. S., Yu J., Nelson K., Miller D., Grey S., Xu Z., Bar-Ziv E., Vorst K. L., Curtzwiler G. W., Van Lehn R. C., Zavala V. M., Huber G. W. Recycling of a post-industrial printed multilayer plastic film containing polyurethane inks by solvent-targeted recovery and precipitation. *Resources, Conservation and Recycling.* 2023. Vol. 197. Art. 107086. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107086.
10. Tito E., dos Passos J. S., Bensaid S., Pirone R., Biller P. Multilayer plastic film chemical recycling via sequential hydrothermal liquefaction. Resources, *Conservation and Recycling*. 2023. Vol. 197. Art. 107067. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107067.
11. Lin Y., Severson M. H., Nguyen R. T., Johnson A., King C., Coddington B., Hu H., Madden B. Economic and environmental feasibility of recycling flexible plastic packaging from single stream collection. Resources, *Conservation and Recycling.* 2023. Vol. 192. Art. 106908. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106908.
12. Berkane I., Aracil I., Fullana A. Improvement of multilayer plastic delamination using surface modification. Resources, *Conservation and Recycling.* 2024. Vol. 202. Art. 107357. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107357.
13. Romeiro A., Teixeira C., Costa H., Coelho J. F. J., Serra A. C. Recycling Polyethylene/Polyamide Multilayer Films with Poly(isoprene-g-Maleic Anhydride) Compatibilizer. *Polymers.* 2024. Vol. 16, No. 8. Art. 1079. DOI: https://doi.org/10.3390/polym16081079.
14. Šleiniūtė A., Mumladze T., Denafas G., Makarevičius V., Kriūkienė R., Antonov M., Vasarevičius S. Mechanical Properties of Polymers Recovered from Multilayer Food *Packaging by Nitric Acid. Sustainability.* 2024. Vol. 16, No. 5. Art. 2106. DOI: https://doi.org/10.3390/su16052106.
15. Tamizhdurai P., Mangesh V. L., Santhosh S., Vedavalli R., Kavitha C., Bhutto J. K., Alreshidi M. A., Yadav K. K., Kumaran R. A state-of-the-art review of multilayer packaging recycling: Challenges, alternatives, and outlook. *Journal of Cleaner Production.* 2024. Vol. 447. Art. 141403. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141403.

Дата першого надходження статті до видання: 20.10.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.11.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.11.2026