

Бочарова О. С., магістр, Макєєва І. С., доцент

Київський національний університет технологій та дизайну
ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРІВ

Анотація. Досліджено інноваційні підходи до вирішення проблеми полімерних відходів, включаючи нові технології та матеріали та розглянути практичне застосування методів знешкодження в умовах України, аналізуючи існуючу інфраструктуру та потенціал для розвитку галузі.

Ключові слова: довкілля, полімери, пластикові вироби, знешкодження, утилізація.

Bocharova O. S., Makyeyeva I. S.

Kyiv National University of Technologies and Design

INNOVATIVE APPROACHES TO THE DESTRUCTION OF POLYMERS

Abstract. Innovative approaches to solving the problem of polymer waste are studied, including new technologies and materials, and consider the practical application of disposal methods in the conditions of Ukraine, analyzing the existing infrastructure and the potential for the development of the industry.

Keywords: environment, polymers, plastic products, destruction, recycling.

Вступ. Полімерні відходи становлять особливу небезпеку через свою довговічність та стійкість до природного розкладання. Пластикові вироби можуть зберігатися в навколишньому середовищі сотні років, поступово розпадаючись на мікрочастинки, які забруднюють ґрунт, воду та повітря. Згідно з дослідженнями, до 2050 року маса пластику в океанах може перевищити загальну масу риби, що матиме катастрофічні наслідки для морських екосистем та біорізноманіття планети [1].

Україна, як і більшість країн світу, стикається з серйозним викликом у сфері поводження з полімерними відходами. За оцінками експертів, в Україні щороку утворюється близько 3,5 мільйонів тонн твердих побутових відходів, значну кількість яких складають пластикові відходи [2]. При цьому рівень переробки пластику в країні залишається низьким, що призводить до накопичення відходів на полігонах та несанкціонованих звалищах.

У цьому контексті розробка та впровадження ефективних методів знешкодження використаних полімерів стає актуальним завданням і нагальною необхідністю для збереження нашої планети та забезпечення сталого розвитку суспільства. Важливість цієї проблеми підкреслюється на міжнародному рівні: ООН включила боротьбу з пластиковим забрудненням до Цілей сталого розвитку, а Європейський Союз прийняв стратегію щодо пластику в економіці замкнутого циклу, яка передбачає повну переробку пластикових упаковок до 2030 року [3].

Постановка завдання обумовлена критичною необхідністю розробки та впровадження ефективних методів боротьби з полімерним забрудненням. В рамках даного завдання потрібно дослідити інноваційні підходи до вирішення проблеми полімерних відходів, включаючи нові технології та матеріали та розглянути практичне застосування методів знешкодження в умовах України, аналізуючи існуючу інфраструктуру та потенціал для розвитку галузі. **Метою роботи** було всебічне вивчення та аналіз існуючих способів знешкодження використаних полімерів, оцінка їх ефективності та екологічності, а також дослідження перспективних напрямків розвитку цієї галузі.

У ході роботи були використані різноманітні методи дослідження, включаючи аналіз наукової літератури, статистичний аналіз даних, порівняльний аналіз технологій,

експертні оцінки та моделювання процесів. Це дозволило забезпечити комплексний підхід до вивчення проблеми та отримати обґрунтовані результати.

Результати досліджень. Середній час використання пластикового виробу становить лише кілька місяців, тоді як період його розкладання в природі може тривати сотні років [4]. Цей контраст між коротким терміном використання та тривалим періодом розкладання є однією з ключових проблем, пов'язаних з полімерними відходами. Полімерні відходи потрапляють у довкілля різними шляхами: через неналежну утилізацію, випадкове викидання, промислові викиди та стічні води.

Економічні та соціальні наслідки забруднення полімерами також значні. За даними Програми ООН з навколишнього середовища, щорічні економічні втрати від пластикового забруднення океанів оцінюються у мільярди доларів США.

Існуючі методи знешкодження використаних полімерів можна класифікувати за кількома основними категоріями:

1. Механічна переробка: подрібнення, сортування, промивання, переплавлення та формування нових виробів.

Механічна переробка є найбільш поширеним методом, який дозволяє повторно використовувати полімерні матеріали без значної зміни їх хімічної структури. Цей метод особливо ефективний для переробки термопластичних полімерів, таких як поліетилен (PE) та поліетилентерефталат (PET). Процес включає збір, сортування, подрібнення, промивання, сушіння та переплавлення пластику для виробництва нових виробів. Ефективність механічної переробки значною мірою залежить від чистоти та однорідності вхідної сировини [5].

2. Хімічна переробка: деполімеризація, газифікація, розчинення та каталітичний крекінг.

Хімічні методи переробки дозволяють розщеплювати полімери на вихідні мономері або інші хімічні сполуки, які можуть бути використані для виробництва нових полімерів або інших продуктів. Ці методи особливо корисні для переробки змішаних або забруднених полімерних відходів.

3. Термічна переробка: піроліз, спалювання з отриманням енергії, плазмова газифікація.

Термічні методи використовують високі температури для розкладання полімерів. Піроліз, який відбувається за відсутності кисню, дозволяє отримати рідкі та газоподібні вуглеводні, які можуть бути використані як паливо або сировина для хімічної промисловості. Спалювання з отриманням енергії дозволяє використовувати теплову енергію від горіння пластику для виробництва електроенергії або опалення. Однак ці методи можуть призводити до утворення шкідливих викидів, що вимагає застосування складних систем очистки [6].

4. Біологічна деградація: компостування, використання ферментів, біоремедіація за допомогою мікроорганізмів.

Біологічні методи засновані на використанні живих організмів або ферментів для розкладання полімерів. Ці методи найбільш ефективні для біорозкладаних полімерів, але дослідження в цій галузі продовжуються з метою розширення спектру полімерів, що піддаються біодеградації. На рисунку 1 наведена фотографія, що демонструє процес розкладання біорозкладаного пластику в природних умовах (серія знімків у різні моменти часу). Компостування є найбільш поширеним методом біологічної деградації, але він обмежений типами біорозкладаних пластиків [6].

Вибір оптимального методу знешкодження залежить від багатьох факторів, включаючи тип полімеру, масштаби переробки, економічну доцільність та екологічні наслідки. У багатьох випадках найефективнішим підходом є комбінація різних методів.

Наприклад, механічна переробка може бути використана для чистих та однорідних відходів, тоді як хімічна або термічна переробка може бути застосована до змішаних або забруднених полімерних відходів.



Джерело: [6].

Рис. 1. Біорозкладний пластик

Важливо відзначити, що попри різноманітність методів знешкодження, найефективнішим підходом до вирішення проблеми полімерних відходів залишається зменшення їх виробництва та споживання, а також впровадження принципів циркулярної економіки. Це включає розробку продуктів з урахуванням їх повторного використання та переробки, впровадження систем повернення та повторного використання упаковки, а також підвищення обізнаності споживачів щодо правильного поводження з пластиковими відходами [6].

Для вирішення проблеми полімерних відходів проведено комплексний порівняльний аналіз різних методів їх знешкодження, табл. 1. Цей аналіз дозволяє визначити оптимальні підходи для різних типів полімерів та умов їх утилізації [7].

Таблиця 1

Порівняльна таблиця методів знешкодження полімерів

Метод	Енерго-ефективність	Екологічність	Економічна ефективність	Технологічна складність	Придатність для змішаних відходів
Механічна переробка	Висока	Середня	Висока	Низька	Низька
Хімічна переробка	Середня	Висока	Середня	Висока	Середня
Термічна переробка	Низька	Низька	Середня	Середня	Висока
Біологічна деградація	Висока	Висока	Низька	Середня	Низька

Джерело: розроблено автором на основі [5–7].

Розвиток технологій продовжує впливати на ефективність та доцільність різних методів знешкодження. Інновації у сфері сортування відходів, каталізаторів для хімічної переробки, систем очистки викидів при термічній переробці та розробки нових біорозкладаних матеріалів можуть змінити баланс між різними методами в майбутньому [8].

Основні напрямки інноваційних розробок включають:

1. Удосконалені методи сортування.
2. Хімічний рециклінг нового покоління (розробка селективних каталізаторів для деполімеризації, використання надкритичних рідин для розчинення та очищення полімерів, розклад пластиків за допомогою спеціально розроблених ферментів).

3. Адитивні технології для переробки (3D-друк з використанням переробленого пластику, розробка нових композитних матеріалів на основі вторинних полімерів).

4. Біотехнологічні підходи (модифікація бактерій для ефективного розкладання пластику, розробка біорозкладаних полімерів на основі природних матеріалів).

5. Плазмові технології (застосування низькотемпературної плазми для модифікації поверхні пластиків, плазмова газифікація для ефективної переробки змішаних полімерних відходів, використання плазми для очищення токсичних викидів при термічній переробці).

6. Нанотехнології в переробці пластику (розробка наноматеріалів для покращення властивостей вторинних пластиків, використання нанокаталізаторів для ефективного хімічного рециклінгу, створення нанофільтрів для очищення води від мікропластику).

7. Інтелектуальні системи управління відходами (впровадження технологій для оптимізації збору та сортування відходів, розробка смарт-контейнерів з функцією автоматичного сортування, створення цифрових платформ для ефективного управління потоками відходів).

Багато з цих інноваційних підходів знаходяться на різних стадіях розробки та впровадження. Деякі вже успішно застосовуються в промислових масштабах, тоді як інші все ще перебувають на стадії лабораторних досліджень.

Роль міжнародного співробітництва та обміну знаннями є критично важливою для прискорення розвитку та впровадження інноваційних технологій. Створення глобальних платформ для обміну досвідом та спільних досліджень може значно прискорити прогрес у вирішенні проблеми пластикових відходів.

Інвестиції в дослідження та розробки в цій галузі не лише сприяють вирішенню екологічних проблем, але й створюють потенціал для економічного зростання та інновацій. Розвиток «зелених» технологій переробки пластику може стати важливим фактором у переході до циркулярної економіки та сталого розвитку.

Україна, як і багато інших країн, стикається з серйозними проблемами у сфері управління полімерними відходами. Практичне застосування методів знешкодження в країні характеризується певними особливостями, пов'язаними з економічними, технологічними та законодавчими факторами

Таблиця 2

Статистичні дані виробництва та утилізації полімерів в Україні

Рік	Виробництво (тис. тонн)	Утилізація (тис. тонн)	% переробки
2020	460	32,2	7%
2021	490	39,2	8%
2022	420	37,8	9%
2023	450	45,0	10%

Джерело: розраховано автором на підставі [9].

Поточна ситуація з переробкою полімерів в Україні:

1. Обсяги та структура відходів: щорічно в Україні утворюється близько 500 тисяч тонн полімерних відходів. Близько 40% складають відходи упаковки, 25% - будівельні відходи, решта - відходи електроніки, автомобільної промисловості.

2. Інфраструктура переробки: в Україні функціонує близько 100 підприємств, що займаються переробкою пластику. Більшість підприємств зосереджені на механічній переробці. Обмежена кількість потужностей для хімічної та термічної переробки.

3. Рівень переробки за оцінками експертів, в Україні переробляється лише 5-7% полімерних відходів. Більшість відходів потрапляє на звалища або спалюється без отримання енергії.

Обмеження та недоліки:

1. Недосконалість законодавчої бази, а саме, відсутність ефективних механізмів стимулювання переробки, недостатній контроль за утилізацією відходів, потреба в гармонізації законодавства з нормами ЄС.

2. Економічні фактори: низька інвестиційна привабливість сектору переробки, відсутність стабільного ринку вторинної сировини, конкуренція з дешевою первинною сировиною.

3. Технологічні обмеження: застаріле обладнання на багатьох підприємствах, відсутність сучасних технологій сортування та очистки відходів, обмежений доступ до інноваційних технологій переробки.

4. Соціальні аспекти: низький рівень екологічної свідомості населення, недостатня ефективність систем роздільного збору відходів, потреба в освітніх програмах та інформаційних кампаніях [9].

Перспективи розвитку:

1. Впровадження принципів розширеної відповідальності виробника

2. Розвиток інфраструктури для роздільного збору та сортування відходів

3. Модернізація існуючих та будівництво нових переробних потужностей

4. Стимулювання використання вторинних полімерних матеріалів

5. Розвиток міжнародного співробітництва в сфері передових технологій переробки.

Висновки. Інноваційні підходи до знешкодження полімерів відкривають нові можливості для ефективного управління пластиковими відходами. Інноваційні підходи, такі як удосконалені методи сортування, нові каталізatori для хімічної переробки та біотехнологічні рішення, мають значний потенціал для підвищення ефективності знешкодження полімерних відходів та розширення спектру перероблюваних матеріалів.

В Україні ситуація з переробкою полімерних відходів залишається складною, з низьким рівнем переробки та обмеженою інфраструктурою. Основними проблемами є недосконалість законодавчої бази, економічні обмеження та недостатній рівень екологічної свідомості населення.

Для ефективного вирішення проблеми полімерних відходів в Україні необхідний комплексний підхід, який включає вдосконалення законодавства, розвиток інфраструктури, впровадження сучасних технологій та підвищення екологічної свідомості населення.

Список використаної літератури

1. Ellen MacArthur Foundation (2016). The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics. 7 p.
2. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, 2021. 12 с.
3. European Commission (2018). A European Strategy for Plastics in a Circular Economy. P. 3–4.
4. Geyer, R., Jambeck, J. R., Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782, P. 1–3.
5. Ragaert, K., Delva, L., Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69: 24–58.
6. Hopewell, J., Dvorak, R., Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526): 2115–2126.
7. Petruk, R., Kostyuk, V., Vishnevsky, V. (2021). Plastic waste management in Ukraine: challenges and opportunities. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(3): 175–190.
8. Ru, J., Huo, Y., Yang, Y. (2020). Microbial degradation and valorization of plastic wastes. *Frontiers in Microbiology*, 11, 442.
9. Міщенко В. С., Виговська Г. П. Організаційно-економічний механізм поводження з відходами в Україні та шляхи його вдосконалення. Київ: Наукова думка, 2019. С. 45–59.