

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.3.10>

УДК 678.743.22

САВЧУК А. П., СОБА Н. В.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ПЕРЕРОБКА ПОЛІВІНІЛХЛОРИДУ В УМОВАХ ЦИКЛІЧНОЇ ЕКОНОМІКИ

Мета. Визначення сучасного стану переробки ПВХ відходів та пошук напрямків адаптації технологій переробки ПВХ до сучасних вимог циклічної економіки.

Методика. Використано методи літературно-системного аналізу наукових публікацій за тематикою дослідження та узагальнення отриманих результатів дослідження.

Результати. Розглянуто стан питання застосування полімерних матеріалів та переробки полімерних відходів у світі. Проведено аналіз існуючих способів отримання полівінілхлориду та наведено можливі сфери застосування кожного способу. Розглянуто основні рецептурні склади ПВХ композицій для виготовлення жорстких та м'яких виробів. Описано вплив різних типів добавок на експлуатаційні властивості виробів з ПВХ. Проаналізовано існуючі способи переробки ПВХ композицій в готові вироби. Наведено статистичні дані щодо сфер застосування виробів з ПВХ в різних країнах. Проведено детальний аналіз щодо джерел утворення відходів полівінілхлориду та наведено їх основні характеристики. Систематизовано існуючі способи переробки різних видів відходів ПВХ. Проаналізовано переваги та недоліки існуючих технологій. Запропоновано сучасні підходи до організації процесів переробки відходів полівінілхлориду.

Наукова новизна. Запропоновано принципи переробки відходів полівінілхлориду, засновані на їх фізичній модифікації, які задовольняють потреби циклічної економіки.

Практична значимість. Систематизовано дані щодо джерел утворення відходів полівінілхлориду, наведено можливі способи їх переробки. Проаналізовано переваги та недоліки існуючих технологій та способів переробки відходів ПВХ. Запропоновано впровадження циклічного способу переробки відходів ПВХ, шляхом розробки нових та коректування існуючих рецепту ПВХ композицій щодо збільшення вмісту термостабілізуючих добавок та застосування добавок з пролонгованим впливом.

Ключові слова: полівінілхлорид; циклічна економіка; переробка; полімерні відходи.

Вступ. Полімери та полімерні матеріали є однією з сучасних світових промислових інновацій, яка застосовується у багатьох галузях, таких як пакування, електричне та електронне обладнання, будівництво, сільське господарство, охорона здоров'я та автомобілебудування. Завдяки своїй легкій, міцній, багатоцільовій природі та простоті в обробці, їх виробництво за останні 60 років значно зросло, досягнувши приблизно 400,3 млн т до 2023 року, з прогнозом подвоєння цієї кількості до 2050 року [1–3]. Щороку у світі виробляється близько 350 мільйонів тонн пластикових відходів [4]. Ефективне поводження з пластиковими відходами має важливе значення для побудови сталих і придатних для життя міст. Однак у багатьох країнах, що розвиваються, належне поводження з відходами залишається проблемою, що призводить до неналежної та неконтрольованої практики утилізації [5]. Такі фактори, як погана інфраструктура поводження з відходами та застосування недосконалих технологій переробки, у поєднанні з недостатньою обізнаністю населення та відсутністю стимулів, призвели до того, що пластикові відходи стали повсюдним явищем у навколишньому середовищі [4, 6]. Приблизно 78% що складає 6,3 гігатон пластикових відходів, які коли-небудь вироблялися, були захоронені на звалищах або деінде в навколишньому середовищі [2]. Це становить серйозну загрозу для довкілля та здоров'я людей і створює величезну втрачену можливість створення цінної вторинної сировини з цього ресурсу. Пластмаси можуть розкладатися дуже довго, а це означає, що вони залишаються в навколишньому середовищі, завдаючи шкоди біорізноманіттю та екосистемі, а також призводять до соціальних та економічних втрат [7]. Наприклад, пластик, що заплутався в

коралових рифах в Азійсько-Тихоокеанському регіоні, може спричинити стрес для коралів, через дефіцит світла, виділення токсинів. Це може збільшити ймовірність спалахів хвороб, що загрожує екосистемам, які забезпечують їжу, захист узбережжя, дохід і культурні блага для понад 275 мільйонів людей [8]. Коли пластик руйнується, він розпадається на крихітні шматочки, які називаються мікропластиком. Мікропластик непомітний у навколишньому середовищі, але може мати далекосяжні наслідки [7]. Він може завдавати фізичної та токсикологічної шкоди при потраплянні в організм біоти або при вдиханні, а також може потрапляти в харчовий ланцюг, що потенційно може призвести до шкідливого впливу на здоров'я людини [9] через біоаккумуляцію та хронічний вплив [10]. Приблизно 1,7 мільйона тонн пластикових відходів у світі потрапляє у океан [4], і якщо лінійна економічна модель «бери-виробляй-використовуй-утилізуй» продовжуватиме переважати, то до 2050 року в океанах буде більше пластику за вагою, ніж риби [1]. Як наслідок, пластикові відходи розглядаються як серйозна проблема поводження з твердими побутовими відходами, що займає одне з перших місць у глобальному політичному порядку [11].

Не зважаючи на недоліки, пластики це невід'ємна складова сучасного світу. Серед великого різноманіття пластиків одним з найбільш вживаних є полівінілхлорид. З полівінілхлориду отримують вироби широкого застосування від ізоляції кабелю до медичних виробів. Велика частка виробів з полівінілхлориду є виробами довгострокового вжитку з терміном служби 10–40 років. І найближчим часом очікується значне збільшення утворення таких відходів ПВХ. Полівінілхлорид помилково вважається складним для переробки через його високу в'язкість та схильність до деструкції під час переробки. Однак існує низка методів хімічної та фізичної модифікації ПВХ які постійно вдосконалюються. Найбільш масовою є хімічна модифікація або стабілізація ПВХ, що передбачає введення хімічно активних сполук, котрі впливають на механізм розкладу полімеру. Менш розповсюдженою є фізична модифікація, котра передбачає введення сполук, що впливають на реологічні та адгезійні властивості. ПВХ надзвичайно рідко підлягає переробці в немодифікованому стані. Стабілізатори та модифікатори вводять в полімер ще на стадії виробництва, але основна модифікація здійснюється на стадії формулювання рецептурного складу. Сполуки, котрі використовуються для стабілізації та модифікації ПВХ за звичай значно коштовні за полімер і використовуються в рецептурному складі згідно різних підходів. Найбільш вживаний підхід – введення мінімально можливого вмісту для забезпечення переробки та низької собівартості. Вторинна переробка при цьому має бути забезпечена завдяки рестабілізації. Враховуючи цілі циклічної економіки більш доцільним є підхід в надлишковій стабілізації та модифікації, котрий забезпечить стабільну та надійну придатність до повторної переробки. Дослідження стабілізації та модифікації ПВХ в умовах багаторазової переробки відомі з літературних джерел [12], в загальному вони мають на меті встановити кількість циклів переробки до настання критичної зміни властивостей полімеру. Вимогою сучасності є багаторазова переробка та повне збереження властивостей, застосування умов часткової переробки вторинної та первинної сировини та застосування наповнювачів.

Метою досліджень є визначення сучасного стану переробки ПВХ відходів та пошук напрямків адаптації технологій переробки ПВХ до сучасних вимог циклічної економіки.

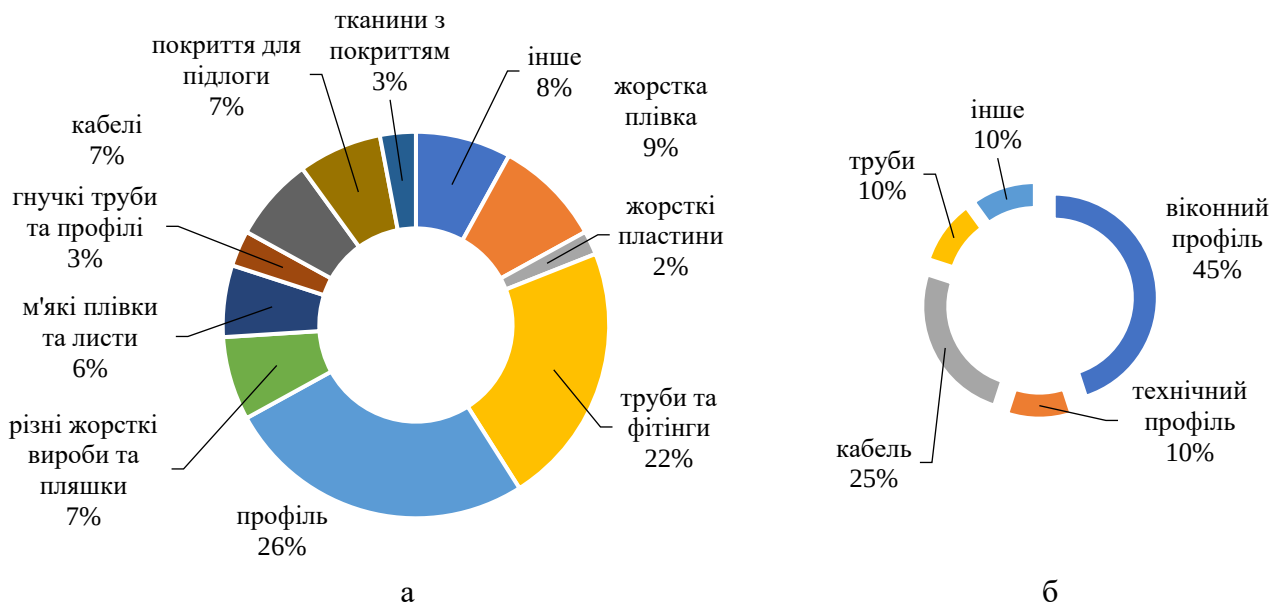
Полівінілхлорид. Полівінілхлорид – популярний пластик, що має тривалий термін служби та хороші механічні, електричні, хімічні та термічні властивості. В залежності від способу отримання, рецептури і технології переробки можна отримати широкий асортимент ПВХ виробів: твердих та м'яких, прозорих та зафарбованих у будь який колір, виробів що експлуатуються у температурному діапазоні -50 до +80°C. До 2023 року у Європі вироблялося близько 5,9 мільйонів тонн на рік [12].

Вініл хлорид є одним із вихідних матеріалів, що використовується для синтезу ПВХ. У результаті лише 43% полімерної маси надходить із нафтохімічної сировини. Низький

вуглецевий слід ПВХ виробів з тривалим терміном служби є додатковою екологічною перевагою. Наприклад, вуглецевий слід стадії виробництва та всього життєвого циклу виробів з ПВХ може бути значно нижчим порівняно з іншими матеріалами, навіть тими, які зазвичай вважаються екологічно чистими [13–15].

Високе економічне значення ПВХ є наслідком не тільки його низьких витрат на виробництво, але в першу чергу визначається його хорошими властивостями, найважливішими з яких є висока хімічна стійкість і сприятливі механічні властивості, а також стійкість до води та погодних умов. Висока прозорість цього полімеру означає, що він використовується у виробництві фольги, блістерів або світлопроникних панелей. ПВХ демонструє численні унікальні додаткові характеристики, такі як стійкість до утворення біоплівки [16], висока ударна міцність, універсальна модифікація гнучкості, здатність до блиску та легкість зв'язування. Він класифікується як матеріал, що самостійно виділяється (LOI твердого ПВХ становить приблизно 44–49%) [17]. Завдяки можливому застосуванню значних кількостей пластифікаторів це дозволяє отримати тверді та м'які варіанти, які значно відрізняються за температурою склування та гнучкістю при певній робочій температурі [18].

Застосування ПВХ. ПВХ використовується в будівництві, автомобільній, трубопровідній і кабельній промисловості, включаючи багато побутових товарів. ПВХ міцний, довговічний, легкий і універсальний. ПВХ це ідеальний матеріал для багатьох застосувань. Понад 75% загального обсягу ПВХ використовується в промисловості, особливо в будівництві (рис. 1), де вироби з ПВХ мають тривалий термін служби – понад 10 років. Будівництво, автомобільна промисловість, пакувальна промисловість та електроніка є основними секторами, де ПВХ-пластик використовується в Європі [19]. Наприклад, понад 60% виробництва ПВХ у Західній Європі використовується тільки в будівлях і будівельному секторі [20].



Джерело: [21].

Рис. 1. Сфери застосування ПВХ та їх розподіл: (а) ЄС; (б) Україна

ПВХ добавки. Рецептури ПВХ містять велику кількість добавок, які виконують важливі функції під час їх переробки та регулюють експлуатаційні властивості кінцевої продукції. До таких добавок відносяться пластифікатори, наповнювачі, пігменти та барвники, термостабілізатори та стабілізатори від ультрафіолету, модифікатори ударної стійкості, антиблокуючі агенти, роздільні агенти, агенти ковзання, антистатики, антипірени,

лубриканти, процесінгові добавки, модифікатори температури теплової деформації та температури розм'якшення Віка, спінювачі та промоутери, засоби проти запотівання, агенти зшивання, промоутери адгезії, відбілювачі, біоциди та фунгіциди, магнітні добавки, флексибілізатори, ядроутворюючі агенти або агенти підвищення кристалічності [22]. Приклади рецептури жорсткого ПВХ наведені у таблицях (табл. 1–4).

Таблиця 1

Рецептура жорсткої ПВХ композиції (віконний профіль)

Компонент	Марка	Кількість, мас. частини
ПВХ	K70	100
Крейда	-	5
Стабілізатор, кальцій/цинк	BP MC 91424 FP/1	3,5
Модифікатор ударостійкості, акрил	DL 55	5
Модифікатор переробки, акрил середньої молекулярної маси	DL 125	0,5
Оксид титану	Kronos 1220	2,5

Таблиця 2

**Рецептура частково пластифікованої ПВХ композиції
(кутник будівельний з перфорацією)**

Компонент	Марка	Кількість, мас. частини
ПВХ	K67	100
Крейда	-	60
Стабілізатор, свинець	BP SMS 318 R/5	4
Модифікатор переробки, акрил середньої молекулярної маси	DL 125	0,4
Двуокис титану	R 218	1
Лубрикант зовнішній ПЕ віск	BL R 381	0,4
Лубрикант внутрішній, ефірний віск	BL LTP	0,2
Пластифікатор, ДОТФ	Ergoplast TDO	5

Таблиця 3

Рецептура ПВХ пластикату (кабельна оболонка під О-406)

Компонент	Марка	Кількість, мас. частини
ПВХ	K70	100
Крейда	-	50
Стабілізатор, кальцій цинк	BP MC 92807KA	3
Лубрикант зовнішній, ПЕ віск.	BL R 381	0,2
Епоксидована соєва олія	BL LSA	1,5
Пластифікатор, ДОТФ	Ergoplast TDO	70
Оптичний відбілювач	-	~ 0,1
Борат цинку	-	~ 0,1

Таблиця 4

Рецептура ПВХ пластизолу (покриття робочих рукавиць)

Компонент	Марка	Кількість, мас. частини
ПВХ емульсійний	EP703	100
Крейда	-	25
Пластифікатор, ДОТФ	Ergoplast TDO	70
Епоксидована соєва олія	BL LSA	2
Стабілізатор, кальцій цинк	BS NT 170	0.5

Пластифікатори додають до ПВХ для надання необхідної гнучкості та еластичності виробу. Застосування гнучкого ПВХ включають ізоляцію кабелів, плівку, м'які меблі, м'які іграшки, шланги та мішки для крові. Найпоширенішими пластифікаторами є алкілові ефіри фталевої кислоти, такі як ді-(2-етилгексилфталат) (або скорочено DEHP) тощо, іноді змішані з хлорованим парафіновим маслом. Як для гнучких, так і для жорстких композицій ПВХ потрібні стабілізатори, щоб запобігти тепловим та світловим змінам у молекулярній структурі полімерного ланцюга, що супроводжується виділенням хлористого водню, та призводить до зміни кольору та крихкості. Без додавання стабілізаторів ПВХ швидко деструктує під час процесів екструзії/змішування та в повсякденному використанні. Традиційні стабілізатори містять солі металів, зокрема свинцю, цинку, олова, кальцію та барію та меншою мірою кадмію. Приклади систем стабілізаторів включають сульфати, карбонати, стеарати та лаурати вищевказаних металів.

ПВХ є одним із найбільш вогнестійких полімерів, але лише в жорстких композиціях, які не містять багатьох інших добавок. Додавання інших полімерів або добавок знижує його вогнестійкість настільки, що часто потрібно додавати спеціальні пластифікатори, органічні антипірени або спеціальні наповнювачі. Пластифікований ПВХ повинен містити принаймні 20% вогнезахисного пластифікатора, щоб бути самозатухаючим.

Стабілізатори зазвичай додають у кількості від 1 до понад 8 частин на 100 частин ПВХ, залежно від застосування. Ізоляція кабелю, наприклад, може містити відносно високий рівень стабілізатора свинцю, необхідного для надання максимальної теплової стабільності. Існує дуже широкий вибір систем стабілізації. Фактори, які обумовлюють вибір для певного застосування, окрім вартості та термостабільності готового продукту, включають ризики токсичності (свинець і кадмій не використовуються для харчової упаковки та медичних виробів), прозорість і зовнішній вигляд готового продукту та сумісність з іншими добавками. Інші добавки включають інертні наповнювачі, такі як крейда, пігменти та барвники, спінювачі для надання текстури піни (на шпалерах, шкірозаміннику тощо), мастила для зменшення нагрівання тертям під час екструзії та формування, антипірени та інші полімери, добавки для покращення ударостійкості. Завдяки своїй універсальності як полімер, ПВХ знаходить застосування в дуже широкому діапазоні продуктів, і, таким чином, зустрічається в широкому діапазоні потоків відходів, коли ці продукти досягають кінця свого терміну служби. Тому ПВХ матеріали з такими добавками можуть становити різні ризики для навколишнього середовища та здоров'я. З приходом нових обмежень і правил, небезпечні ПВХ добавки, які використовувалися в минулому, тепер з'являються у потоках відходів і ускладнюють поводження з відходами. Наприклад, переробка матеріалу старого ПВХ часто ускладнюється через постійне припинення використання таких фталатів, як біс-(2-етилгексил)фталат (DEHP), дибутилфталат (DBP), диізобутилфталат (DIBP) та бензилбутилфталат (BBP), які обмежені регламентом ЄС REACH. Спалювання відходів ПВХ історично було проблематичним через утворення діоксинів і твердих відходів, що містять важкі метали. Тим часом у багатьох країнах вивезення і захоронення ПВХ відходів дедалі більше обмежується [23].

Способи переробки ПВХ. До основних способів переробки ПВХ відносять: видувне формування, каландрування, екструзію, інжекційне формування, ламінування, ротаційне формування, виробництво композитів, герметиків, дроту та кабелю, нанесення ПВХ покриттів(паст) на полотно, покриття волокон та нитки, термоформування та спікання.

Видувне формування є основним способом виробництва порожнистих пластмасових виробів. Пляшки та контейнери є основними продуктами видувного формування. Його можна виконувати за допомогою: екструзійно-видувного формування, інжекційно-видувного формування, розтяжного видувного формування. В усіх методах першим етапом є виготовлення заготовки у вигляді преформи, яка на наступному етапі роздувається до готового виробу. Видувне формування найчастіше використовується для кристалічних полімерів (наприклад, ПЕТ), але двоосьове розтягування (орієнтація) також може використовуватися у випадку ПВХ пляшок для покращення їхніх механічних властивостей. ПВХ має кілька важливих властивостей, таких як висока прозорість, чудова кислотостійкість, хороші бар'єрні властивості для кисню та хороша малостійкість. Звичайними недоліками ПВХ є низька температура деформації, нижча стійкість до ударів (яку можна покращити), низька термостійкість (яку можна покращити шляхом правильного вибору стабілізаторів) і середня морозостійкість. Типова композиція для видувного формування включає такі компоненти: ПВХ (від низької до середньої молекулярної маси), ударний модифікатор (зазвичай акрил і у відносно високій концентрації), допоміжний засіб для обробки акрилу, внутрішній змащувач, зовнішній змащувач, термостабілізатор.

Каландруванням виготовляють ПВХ плівки, підлогові покриття, підкладки для басейнів, покрівельні мембрани, листи, спінену шкіру. Типова композиція, яка використовується у виробництві каландрованої плівки, включає наступне: ПВХ (від середньої до високої молекулярної маси), пластифікатори (найчастіше фталати), наповнювачі (найчастіше карбонат кальцію), лубриканти (найбільш популярні стеаринова кислота і стеарати), термостабілізатори, вторинні термостабілізатори (епоксидовані масла, фосфіти, а останнім часом натрію перхлорат) багато інших добавок використовуються залежно від застосування плівки та її бажаних властивостей.

Екструзія є найпоширенішим методом переробки ПВХ, особливо через масштабне виробництво профілів, які використовуються у виробництві вікон і дверей та інших будівельних матеріалів. Екструзію з ПВХ виготовляють жалюзі, компаунди, огорожі та настили, віконні та дверні профілі, спінені профілі, прокладки, інтер'єрні профілі, панелі, труби, гнучкі трубки та шланги, дошки, сайдинги, листи.

Екструдовані вироби здебільшого виготовляються без пластифікаторів. Напівжорсткі склади ПВХ композицій використовуються для медичних інструментів і трубок, а гнучкі - для виготовлення прокладок, деяких труб (наприклад, іригаційних труб), деяких медичних інструментів і гідроізоляційних ущільнень.

Інжекційним формуванням виготовляються в основному муфти, фітінги та іграшки.

ПВХ-пластизолі та латекси використовуються у виробництві багатьох корисних продуктів, включаючи захист склотканини, що використовується для зміцнення цементних плит та інших виробів, виробництво дихаючих тканин, сплєтених з волокон з ПВХ покриттям, волоконну оптику, тощо.

ПВХ застосовується для виготовлення багатьох композиційних матеріалів із порошковими та волокнистими наповнювачами. До волокнистих відносять целюлозне волокно, а до порошків – слюду, глину, деревне борошно, сажу, скляні кульки, гідрокальцит, тригідрат оксиду алюмінію, поліпірол і різні наноматеріали, включаючи нанокарбонати кальцію. Ефекти формування композиту не лише обмежуються покращенням механічних властивостей, таких як ударна в'язкість, міцність на розрив та багато інших, але також включають покращення тепло- та електропровідності (технічний вуглець, поліпірол),

зменшення міграції води (пластинчасті наповнювачі, такі як тальк і слюда), підвищення вогнестійкості (тригідрат оксиду алюмінію), і декоративне значення. Виробництво композиційного матеріалу зазвичай вимагає складної рецептури і технології виробництва. Більшість композитів з ПВХ виготовляються шляхом екструзії або лиття під тиском.

ПВХ відходи. Склад відходів відіграє потенційно важливу роль у визначенні викидів у навколишнє середовище під час їх утилізації, і в цьому відношенні ПВХ нічим не відрізняється від інших відходів. Компаунд ПВХ містить ряд добавок, деякі з яких можуть бути доступні для вилугування з полімерної матриці на звалищах. Інші добавки, такі як важкі метали, можуть бути перетворені в більш мобільні форми після спалювання, тоді як органічні добавки, як правило, руйнуються під час спалювання. Тому нам необхідно розуміти основні інгредієнти та склад типових композицій ПВХ, щоб оцінити навантаження на навколишнє середовище для управління відходами ПВХ.

Існує два основних джерела відходів ПВХ: відходи передспоживання та відходи після споживання. До споживчих відходів відносяться як виробничі, так і монтажні відходи (рис. 2). Виробничі відходи, наприклад, залишки партій від екструзійних формувань, а також різні обрізки та відходи від виробництва листів і профілів. Цей матеріал доступний у чистому стані на місці виробництва, і, отже, більшість переробляється всередині виробничого процесу, тому ніколи не потрапляє до зовнішнього потоку відходів. Додаткові передспоживчі відходи утворюються з обрізків, що залишилися, наприклад, після встановлення підлоги та заміни вікон і труб (відходи встановлення). Передспоживчі відходи становлять близько 12% ПВХ-відходів, що виникають на даний момент, і близько 85% з них (приблизно 420 тис. тонн на рік) наразі переробляється.

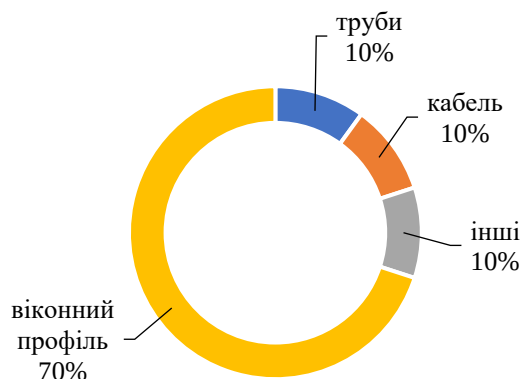


Рис. 2. Розподіл відходів ПВХ в Україні

Переважає джерело відходів ПВХ (близько 88%) – це відходи після споживання. Відходи після споживання складаються з продуктів, які були викинуті в кінці терміну їх використання. Як наслідок, відходи після споживання, як правило, розподіляються у незначній кількості серед великої кількості користувачів і зазвичай вимагають ретельного очищення для видалення забруднень, перш ніж їх можна буде використовувати для переробки. Витрати на збір, сортування та обробку разом роблять витрати на переробку набагато вищими, ніж звичайні варіанти захоронення та спалювання, тому наразі переробляється лише невелика частина (близько 3%) відходів ПВХ після споживання. Деякі відходи після споживання не можливо переробити. Прикладом так відходів можуть бути водопровідні ПВХ труби, які залишаються в землі після заміни. Оцінки відходів базуються на кількості кожного типу продукції, яка, ймовірно, буде утилізована (тобто «доступні» відходи), яка, у свою чергу, базується на історії споживання (виробництво, імпорт та експорт) і передбачуваному терміні служби продукції. Для деяких продуктів із відносно коротким терміном служби (наприклад,

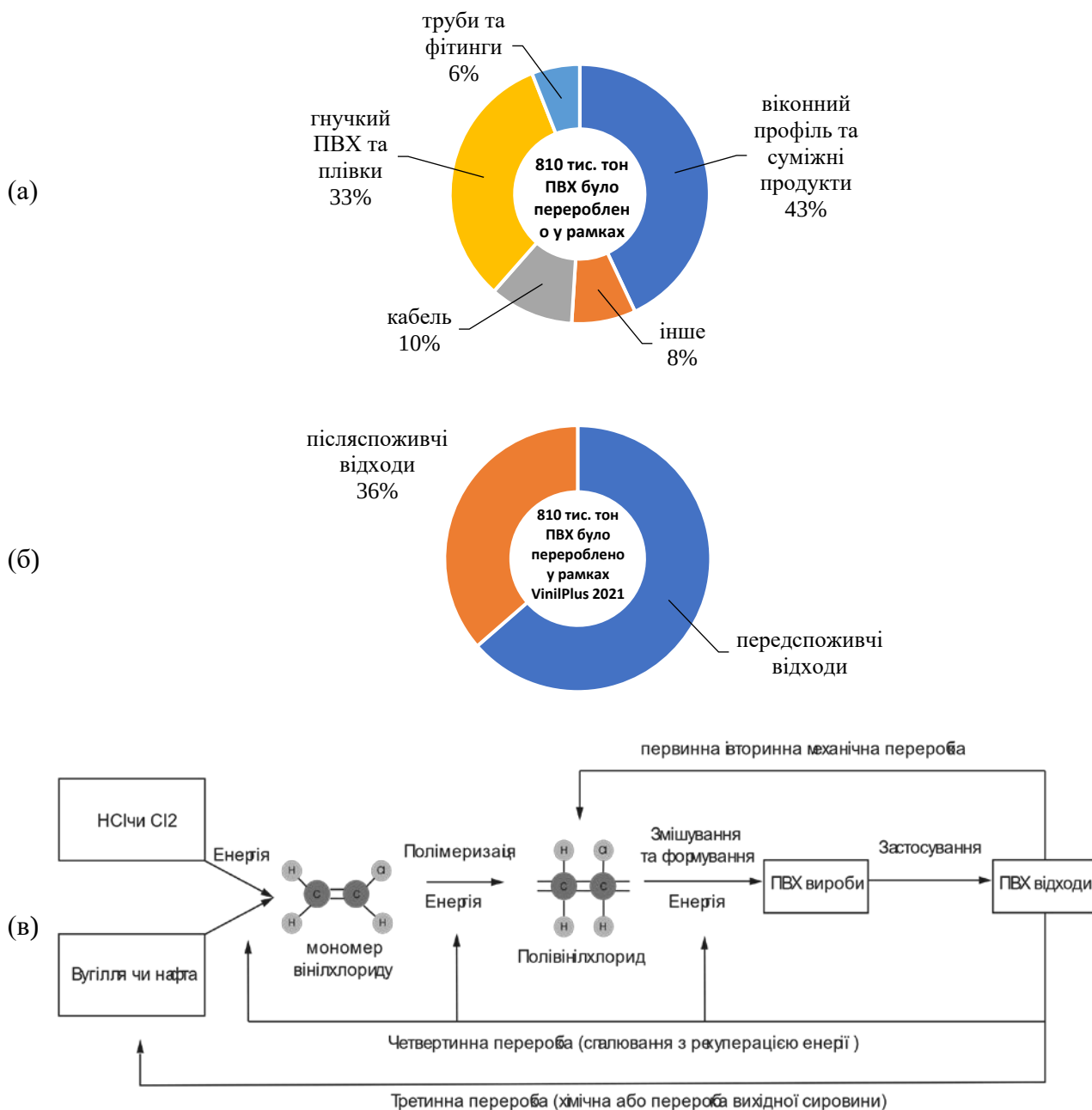
відходи упаковки) більша частина спожитого ПВХ потрапляє у потік відходів протягом одного року після виробництва, тому утворення відходів тісно пов'язане зі структурою споживання. Але для інших продуктів із набагато довшим терміном служби зв'язок між структурою споживання та утворенням відходів є набагато менше зрозумілим. Це відображається співвідношенням утворених відходів до споживання за певний рік. Для короткочасних застосувань, таких як упаковка та побутові відходи, співвідношення перевищує 80%, але знижується нижче 40% для товарів, що застосовуються в електроніці, електротехніці і автомобільних компонентів, лише до 18% – для будівельних застосувань. Діапазон невизначеності загальної кількості відходів ПВХ, що виникає внаслідок цих факторів, оцінюється як +/- 15%.

Незважаючи на політику, яка надає перевагу повторному використанню та переробці, захоронення на сміттєзвалищах залишається основним шляхом утилізації твердих побутових відходів у Європі, на який припадає понад 80% непереробленого матеріалу, причому більшість відходів, що залишилися, йдуть на спалювання, переважно з рекуперацією енергії. Вироби з ПВХ, викинуті в потік побутових і комерційних відходів, швидше за все, підуть тим самим шляхом утилізації, що й тверді побутові відходи, і тому демонструють подібний розподіл між захороненням і спалюванням. Переробка ПВХ значно дорожча для виробника відходів, ніж захоронення на сміттєзвалищі або спалювання, і, отже, рівень переробки зараз дуже низький. Однак плата за утилізацію ПВХ, спаленого разом із твердими побутовими відходами, не відображає повну вартість спалювання, оскільки плата відбувається за набагато більшу кількість реагентів, викидів кислотних газів і залишків, які потребують утилізації, порівняно з твердими побутовими відходами.

Звалище традиційно було найменш витратним варіантом утилізації відходів, але витрати зростають у зв'язку з підвищенням вимог до сміттєзвалищ, для захисту навколишнього середовища. Великі сміттєзвалища сьогодні вимагають великих футеровок, щоб запобігти забрудненню небезпечними речовинами земельних та водних ресурсів і для збору метану, потужного парникового газу, який утворюється в результаті розкладання біовідходів. Спалювання було розроблено в 19 столітті як засіб зменшення маси відходів, які потребують остаточної утилізації, утворюючи в процесі менш небезпечні неорганічні залишки золи для утилізації. На початку 1900-х років спалювання використовувалося як засіб відновлення енергії (тепла або електрики). Лише в Англії до 1912 року працювало близько 76 сміттєспалювальних заводів, які виробляли електроенергію. Початкові цілі спалювання як попередньої обробки для утилізації відходів, а саме стабілізація відходів і зменшення маси, з рекуперацією енергії, де це доречно, залишаються головними цілями сьогодні. Інвестиційні та експлуатаційні витрати на сучасні сміттєспалювальні заводи є значними, але можлива економія на масштабах, оскільки сучасні сміттєспалювальні заводи зазвичай мають потужність від 200 до 1000 тис. тонн на рік. Тому спалювання застосовують у великих агломераціях, утворюючи достатню кількість відходів, щоб зробити його економічно ефективним. Високі витрати на спалювання частково компенсуються продажем енергії, рекуперованої у вигляді тепла та/або електрики, а також продажем переробленого матеріалу, такого як деяка кількість золи та чорних металів, отриманих у процесі спалювання. Менші сміттєспалювальні установки (від 25 до 100 тис. тонн/рік) також широко використовуються для обробки відходів менших, ізольованих громад, але більшість із цих малих сміттєспалювальних установок не рекуперують енергію.

Переробка ПВХ. Управління ПВХ-відходами в Китаї включає звалища, спалювання та переробку [24]. Частка ПВХ-відходів, які розміщуються на смітниках, спалюються та переробляються механічно та хімічно, становлять відповідно 36,0%, 9,3%, 25,5% та 0,8% [25]. Однак сміттєзвалища забруднюють навколишнє середовище і займають багато простору. Крім того, небезпечні добавки можуть вивільнятися і забруднювати ґрунт і підземні води. Також

при спалюванні ПВХ відходів викидаються вуглекислий газ і хлоридна кислота і можуть утворюватися поліхлоровані діоксини та фурани [26]. Залишки містять важкі метали і вважаються небезпечними відходами [27]. Відходи ПВХ зазвичай переробляються в європейських країнах і Японії [28–30]. У 2021 році в рамках VinylPlus було перероблено 810 775 тонн ПВХ-відходів, з яких 63,6% становили відходи попереднього споживання, а 36,4% – відходи після споживання (рис. 3) [31].



Джерело: [31].

Рис. 3. Переробка ПВХ: (а), (б) ПВХ, перероблений у рамках VinylPlus у 2021 році, (в) основні типи переробки ПВХ відходів

Теоретично існує чотири типи переробки (рис. 3, в): первинна (доспоживча) та вторинна (післяспоживча) механічна переробка, третинна переробка та четвертинна переробка [32]. Первинна механічна переробка використовує незабруднений ПВХ – виробничі відходи

для створення нових продуктів. Теоретично ПВХ-відходи можна переробляти за допомогою первинної переробки, яка також називається переробкою в замкнутому циклі. Однак може виникнути багато проблем, таких як вибірковий збір і ручне сортування [32].

Вторинна механічна (післяспоживча) переробка вимагає сортування відходів ПВХ, подрібнення відходів і екструзії [33]. Цей метод переробки більше підходить для твердих і незабруднених відходів ПВХ (наприклад, віконних рам і супутніх виробів, труб та інших твердих матеріалів), але отримані продукти є малоцінними матеріалами [34].

Третинна переробка, а саме хімічна переробка або переробка до сировини, використовується для перетворення відходів ПВХ у хімічні речовини з низькою молекулярною масою, паливо та сировину [35]. Цей спосіб підходить для гнучких, змішаних і забруднених відходів ПВХ, наприклад, покрівлі, покриття, тканини з покриттям, гнучкі плівки. Однак HCl і хлоровані органічні сполуки є побічними продуктами [36, 37].

Четвертинна переробка передбачає спалювання з рекуперацією енергії, яка застосовується майже до всіх відходів ПВХ. Однак при спалюванні виділяється вуглекислий газ і можуть виділятися небезпечні речовини; високі температури необхідні для запобігання утворенню діоксинів [38].

Під час механічної переробки вироби з ПВХ збираються, сортуються та обробляються для отримання вторинної сировини, яка може замінити первинну суміш ПВХ подібного складу та, таким чином, переробляється в подібні продукти, що іноді визначається як «високоякісна переробка». Високоякісна вторинна переробка вимагає високоякісного переробленого матеріалу з дуже низьким ступенем забруднення. Механічна переробка також можлива для забрудненого ПВХ, зазвичай змішаного з іншими пластиками та матеріалами, від яких подальше відокремлення є технічно неможливим або занадто дорогим – наприклад, від тканин з покриттям тощо. Приклади включають пластикові огорожі, дорожні конуси, горщики для рослин і промислові підлоги. Однак можливості перероблення ПВХ з іншими полімерами обмежені необхідністю підтримувати температуру обробки нижче 210 °C, щоб запобігти розкладанню ПВХ. Ця температура надто низька, щоб дозволити змішану переробку з іншими пластиками, такими як поліпропілен, поліамід, полікарбонат і поліетилентерефталат, хоча вона прийнятна для деяких видів поліетилену та полістиролу.

Альтернативою низькоякісній механічній переробці змішаних пластикових відходів є переробка до вихідної сировини, що передбачає термічне руйнування полімерів для отримання вуглеводневої сировини для нафтохімічної промисловості або безпосереднього використання пластикових відходів як відновника в доменних печах. У випадку ПВХ це також вивільняє хлор у формі хлороводню. Згідно з застосовуваною технологією, поточні установки з переробки ПВХ можуть приймати вміст хлору в сировині максимум 10%.

Практика поводження з відходами ПВХ у Північному регіоні (Данія, Швеція, Норвегія та Фінляндія). Регіон відомий високими показниками переробки та передовими екологічними стандартами, а також значною часткою спалювання відходів. Виявлено, що статистика поводження з ПВХ відходами в регіоні є напрочуд поганою. Оцінки щодо утворення відходів ПВХ ненадійні, а офіційні системи звітності в основному відсутні. За винятком Данії та кількох муніципалітетів в інших країнах, немає окремих національних систем збору та переробки ПВХ-відходів після споживання. Окремий збір і переробка існує лише для відходів попереднього споживання, але існують добровільні ініціативи, організовані деякими виробниками/імпортерами підлогових покриттів і труб. Ці системи збирають відносно невелику частку від загальної кількості ПВХ відходів. Набагато більші обсяги ПВХ потрапляють у змішані відходи та зрештою переробляються на заводах з переробки відходів.

Така ситуація ймовірно пов'язана з тим, що вплив відходів ПВХ на навколишнє середовище все ще недостатньо вивчений, що частково формує існуючу національну політику та стратегії управління відходами. Відходи ПВХ складаються з різних типів матеріалів різного

походження, що ускладнює переробку через високі вимоги до якості переробленого матеріалу. Роздільне збирання є дорогим і не дає ефекту масштабу. Тим часом, існуюча надлишкова потужність спалювальної інфраструктури та можливості високотемпературної обробки відповідно до високих стандартів викидів призводять до того, що рекуперація енергії є найпростішим варіантом обробки ПВХ. Збільшення вилучення матеріалів вимагає додаткових політичних втручань, які можуть бути проаналізовані в майбутніх дослідженнях [28].

Також дуже часто під час виробництва, стабілізація ПВХ рецептур відбувається з розрахунку на одну переробку, це призводить до зниження собівартості ПВХ продукції та збільшення доходів компанії, але в довгостроковій перспективі така стратегія веде до накопичення великої кількості відходів ПВХ виробів, які повторно стабілізувати і повторно переробити стає на порядок складніше та енергозатратніше. Такі ПВХ вироби зазвичай подрібнюють до порошкоподібного стану та наносять на поверхню стабілізаційні добавки а потім повторно переробляють. Додавання потрібної кількості добавок під час першої переробки ПВХ може вирішити питання багаторазової переробки ПВХ виробів.

Висновки. З кожним роком збільшується попит на продукцію з полівінілхлориду. Як наслідок, економічно виправдано інвестування коштів, спрямованих на підвищення рівня переробки ПВХ відходів. Особливо обґрунтованою є механічна переробка відходів в процесі виробництва ПВХ продукції. Це, безперечно, найпростіший спосіб, оскільки йдеться про матеріал із визначеним складом і властивостями, а відповідна організація виробництва на підприємстві дозволяє в багатьох випадках використовувати вже наявне обладнання. Що стосується пост споживчих відходів, то організація збору відходів, що гарантує доступність і якість сировини, є стратегічним завданням. Також важливим кроком у переробці таких відходів є удосконалення існуючих методів переробки, як наприклад, фізичних способів модифікації, а саме використання оптимальних параметрів стабілізуючих та змащуючих добавок.

Ще одна проблема полягає в тому, щоб відходи ПВХ включали матеріали, вироблені понад 30 років тому, можуть містити вже заборонені технологічні добавки, такі як термостабілізатори на основі сполук свинцю та деякі пластифікатори. Такі відходи ПВХ, які становлять проблему для вторинної переробки, повинні бути піддані переробці вихідної сировини. Однак це вимагає великих інвестиційних витрат, пов'язаних з необхідністю проектування та будівництва відповідних промислових систем. Тим не менш, у прагненні до циркулярної економіки, навіть якщо рентабельність такої переробки буде дуже низькою, інвестиції можуть бути виправданими з екологічних міркувань, а дослідження з їх розробки також можуть принести відчутні фінансові вигоди в майбутньому.

Незважаючи на складний та багатогранний комплекс властивостей, ПВХ є матеріалом, який, безперечно, підлягає переробці. Крім того, рівень його переробки зростає з кожним роком. А сучасні способи адаптації технології переробки ПВХ відходів в Україні дозволить у майбутньому переробляти такі відходи в нашій державі з позитивним екологічним і фінансовим ефектом, задовольняючи потреби циклічної економіки.

References

Література

- | | |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none">1. Pilapitiya, P. N. T., Ratnayake, A. S. (2024). The world of plastic waste: a review. <i>Cleaner Materials</i>, 100220.2. Jambeck, J. R., Walker-Franklin, I. (2023). The impacts of plastics' life cycle. <i>One Earth</i>, 6(6), 600–606.3. Geyer, R., Jambeck, J. R., Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. <i>Science advances</i>, 3(7), e1700782. | <ol style="list-style-type: none">1. Pilapitiya P. N. T., Ratnayake A. S. The world of plastic waste: a review. <i>Cleaner Materials</i>. 2024. 100220.2. Jambeck J. R., Walker-Franklin I. The impacts of plastics' life cycle. <i>One Earth</i>. 2023. No. 6(6). P. 600–606.3. Geyer R., Jambeck J. R., Law K. L. Production, use, and fate of all plastics ever |
|---|--|

4. Hannah Ritchie (2023). How much plastic waste ends up in the ocean? *OurWorldInData.org*. URL: <https://ourworldindata.org/how-much-plastic-waste-ends-up-in-the-ocean>.
5. The World Bank (2018). Brief e solid waste management. *World Bank Group*. URL: <http://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/solid-waste-management>.
6. Jambeck, J., Hardesty, B. D., Brooks, A. L., Friend, T., Teleki, K., Fabres, J., ... Wilcox, C. (2018). Challenges and emerging solutions to the land-based plastic waste issue in Africa. *Marine Policy*, 96, 256–263.
7. Boucher, J., Friot, D. (2017). Primary microplastics in the oceans: a global evaluation of sources (Vol. 10). Gland, Switzerland: Iucn.
8. Lamb, J. B., Willis, B. L., Fiorenza, E. A., Couch, C. S., Howard, R., Rader, D. N., ... Harvell, C. D. (2018). Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science*, 359(6374), 460–462.
9. Thompson, R. C. (2015). Microplastics in the marine environment: sources, consequences and solutions. *Marine anthropogenic litter*, 185–200.
10. Wright, S. L., Kelly, F. J. (2017). Plastic and human health: a micro issue? *Environmental science & technology*, 51(12), 6634–6647.
11. Rebeiz, K. S., Craft, A. P. (1995). Plastic waste management in construction: technological and institutional issues. *Resources, conservation and recycling*, 15(3–4), 245–257.
12. Lahl, U., Zeschmar-Lahl, B. (2024). More than 30 Years of PVC Recycling in Europe – A Critical Inventory. *Sustainability*, 16(9), 3854.
13. Alsadi, A. (2019). Evaluation of carbon footprint during the life-cycle of four different pipe materials.
14. Alsabri, A., Al-Ghamdi, S. G. (2020). Carbon footprint and embodied energy of PVC, PE, and PP piping: Perspective on environmental performance. *Energy Reports*, 6, 364–370.
15. Jones, M. P., Archodoulaki, V. M., Köck, B. M. (2022). The power of good decisions: Promoting eco-informed design attitudes in plastic selection and use. *Resources, Conservation and Recycling*, 182, 106324.
16. James, N. R., Jayakrishnan, A. (2003). Surface thiocyanation of plasticized poly (vinyl chloride) and its made. *Science advances*. 2017. No. 3 (7), e1700782.
4. Hannah Ritchie. How much plastic waste ends up in the ocean? *OurWorldInData.org*. URL: <https://ourworldindata.org/how-much-plastic-waste-ends-up-in-the-ocean>.
5. The World Bank. Brief e solid waste management. *World Bank Group*. 2018. URL: <http://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/solid-waste-management>.
6. Jambeck J., Hardesty B. D., Brooks A. L., Friend T., Teleki K., Fabres J. ... & Wilcox C. Challenges and emerging solutions to the land-based plastic waste issue in Africa. *Marine Policy*. 2018. No. 96. P. 256–263.
7. Boucher J., Friot D. Primary microplastics in the oceans: a global evaluation of sources (Vol. 10). Gland, Switzerland: Iucn., 2017.
8. Lamb J. B., Willis B. L., Fiorenza E. A., Couch C. S., Howard R., Rader D. N. ... & Harvell C. D. Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science*. 2018. No. 359 (6374). P. 460–462.
9. Thompson R. C. Microplastics in the marine environment: sources, consequences and solutions. *Marine anthropogenic litter*. 2015. P. 185–200.
10. Wright S. L., Kelly F. J. Plastic and human health: a micro issue? *Environmental science & technology*. 2017. No. 51 (12). P. 6634–6647.
11. Rebeiz K. S., Craft A. P. Plastic waste management in construction: technological and institutional issues. *Resources, conservation and recycling*. 1995. No. 15 (3–4). P. 245–257.
12. Lahl U., Zeschmar-Lahl B. More than 30 Years of PVC Recycling in Europe – A Critical Inventory. *Sustainability*. 2024. No. 16 (9). 3854.
13. Alsadi A. Evaluation of carbon footprint during the life-cycle of four different pipe materials. 2019.
14. Alsabri A., Al-Ghamdi S. G. Carbon footprint and embodied energy of PVC, PE, and PP piping: Perspective on environmental performance. *Energy Reports*. 2020. No. 6. P. 364–370.
15. Jones M. P., Archodoulaki V. M., Köck B. M. The power of good decisions: Promoting eco-informed design attitudes in plastic selection and use. *Resources, Conservation and Recycling*. 2022. No. 182, 106324.
16. James N. R., Jayakrishnan A. Surface thiocyanation of plasticized poly (vinyl

- effect on bacterial adhesion. *Biomaterials*, 24(13), 2205–2212.
17. Mark, J. E. (2007). *Physical Properties of Polymers Handbook* Springer. New York.
18. Wypych, G. A. (2020). ChemTec Publishing: Toronto. ON, Canada.
19. PVC (2018). ECVN PVC for building and construction. URL: <http://www.pvc.org/en/p/pvc-for-building--construction>.
20. VinylPlus (2017). PVC Recycling Technologies. URL: https://vinylplus.eu/uploads/downloads/VinylPlus_Recycling_Technologies_30012017.pdf.
21. 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.
22. Wypych, George. PVC formulary. ChemTec Publishing, 2020. URL: <https://shop.elsevier.com/books/pvc-formulary/wypych/978-1-927885-63-5>.
23. PlasticsEurope Plastics – the Facts 2017. *An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data*, 2017. URL: https://www.plasticseurope.org/application/files/5715/1717/4180/Plastics_the_facts_2017_FINAL_for_website_one_page.pdf.
24. Zhao, X., Korey, M., Li, K., Copenhaver, K., Tekinalp, H., Celik, S., ... Ozcan, S. (2022). Plastic waste upcycling toward a circular economy. *Chemical Engineering Journal*, 428, 131928.
25. Liu, Y., Zhou, C., Li, F., Liu, H., Yang, J. (2020). Stocks and flows of polyvinyl chloride (PVC) in China: 1980–2050. *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104584.
26. Buekens, A., Cen, K. (2011). Waste incineration, PVC, and dioxins. *Journal of material cycles and waste management*, 13, 190–197.
27. Zhang, R. Z., Luo, Y. H., Yin, R. H. (2018). Experimental study on dioxin formation in an MSW gasification-combustion process: An attempt for the simultaneous control of dioxins and nitrogen oxides. *Waste Management*, 82, 292–301.
28. Miliute-Plepiene, J., Frâne, A., Almasi, A. M. (2021). Overview of polyvinyl chloride (PVC) waste management practices in the Nordic countries. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100246.
29. Ciacci, L. U. C. A., Passarini, F. A. B. R. I. Z. I. O., Vassura, I. V. A. N. O. (2017). The European PVC cycle: chloride) and its effect on bacterial adhesion. *Biomaterials*. 2003. No. 24 (13). P. 2205–2212.
17. Mark J. E. *Physical Properties of Polymers Handbook* Springer. New York, 2007.
18. Wypych G. A. ChemTec Publishing: Toronto. ON, Canada, 2020.
19. ECVN PVC for building and construction. *www.pvc.org*. 2018. URL: <http://www.pvc.org/en/p/pvc-for-building--construction>.
20. PVC Recycling Technologies. *VinylPlus*. 2017. URL: https://vinylplus.eu/uploads/downloads/VinylPlus_Recycling_Technologies_30012017.pdf.
21. Hopewell J., Dvorak R., Kosior E. Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2009. No. 364 (1526). P. 2115–2126.
22. Wypych, George. PVC formulary. *ChemTec Publishing*. 2020. URL: <https://shop.elsevier.com/books/pvc-formulary/wypych/978-1-927885-63-5>.
23. PlasticsEurope Plastics – the Facts 2017. *An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data*. 2017. URL: https://www.plasticseurope.org/application/files/5715/1717/4180/Plastics_the_facts_2017_FINAL_for_website_one_page.pdf.
24. Zhao X., Korey M., Li K., Copenhaver K., Tekinalp H., Celik S., ... Ozcan S. Plastic waste upcycling toward a circular economy. *Chemical Engineering Journal*. 2022. No. 428, 131928.
25. Liu Y., Zhou C., Li F., Liu H., Yang J. Stocks and flows of polyvinyl chloride (PVC) in China: 1980–2050. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. No. 154, 104584.
26. Buekens A., Cen K. Waste incineration, PVC, and dioxins. *Journal of material cycles and waste management*. 2011. No. 13. P. 190–197.
27. Zhang R. Z., Luo Y. H., Yin R. H. Experimental study on dioxin formation in an MSW gasification-combustion process: An attempt for the simultaneous control of dioxins and nitrogen oxides. *Waste Management*. 2018. No. 82. P. 292–301.
28. Miliute-Plepiene J., Frâne A., Almasi A. M. Overview of polyvinyl chloride (PVC) waste management practices in the Nordic countries. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021. No. 4, 100246.
29. Ciacci L. U. C. A., Passarini F. A. B. R. I. Z. I. O., Vassura I. V. A. N. O. The European PVC cycle: In-use stock and flows. *Resources*,

In-use stock and flows. *Resources, Conservation and Recycling*, 123, 108–116.

30. Seike, T., Isobe, T., Harada, Y., Kim, Y., Shimura, M. (2018). Analysis of the efficacy and feasibility of recycling PVC sashes in Japan. *Resources, conservation and recycling*, 131, 41–53.

31. VinylPlus (2022). Progress Report. Reporting on 2021 Activities. URL: <https://www.vinylplus.eu/wp-content/uploads/2022/05/VinylPlus-Progress-Repor2022.pdf>.

32. Ignatyev, I. A., Thielemans, W., Vander Beke, B. (2014). Recycling of polymers: a review. *ChemSusChem*, 7(6), 1579–1593.

33. Schyns, Z. O., Shaver, M. P. (2021). Mechanical recycling of packaging plastics: A review. *Macromolecular rapid communications*, 42(3), 2000415.

34. 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.

35. Zhang, F., Wang, F., Wei, X., Yang, Y., Xu, S., Deng, D., Wang, Y. Z. (2022). From trash to treasure: Chemical recycling and upcycling of commodity plastic waste to fuels, high-valued chemicals and advanced materials. *Journal of Energy Chemistry*, 69, 369–388.

36. Ragaert, K., Delva, L., Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste management*, 69, 24–58.

37. Kim, S. H., Kwak, S. Y., Suzuki, T. (2006). Photocatalytic degradation of flexible PVC/TiO₂ nanohybrid as an eco-friendly alternative to the current waste landfill and dioxin-emitting incineration of post-use PVC. *Polymer*, 47(9), 3005–3016.

38. Zhang, M., Buekens, A., Jiang, X., Li, X. (2015). Dioxins and polyvinylchloride in combustion and fires. *Waste Management & Research*, 33(7), 630–643.

Conservation and Recycling. 2017. No. 123. P. 108–116.

30. Seike T., Isobe T., Harada Y., Kim Y., Shimura M. Analysis of the efficacy and feasibility of recycling PVC sashes in Japan. *Resources, conservation and recycling*. 2018. No. 131. P. 41–53.

31. Progress Report. Reporting on 2021 Activities. *VinylPlus*. 2022. URL: <https://www.vinylplus.eu/wp-content/uploads/2022/05/VinylPlus-Progress-Repor2022.pdf>.

32. Ignatyev I. A., Thielemans W., Vander Beke B. Recycling of polymers: a review. *ChemSusChem*. 2014. No. 7 (6). P. 1579–1593.

33. Schyns Z. O., Shaver M. P. Mechanical recycling of packaging plastics: A review. *Macromolecular rapid communications*. 2021. No. 42 (3), 2000415.

34. Hopewell J., Dvorak R., Kosior E. Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2009. No. 364 (1526). P. 2115–2126.

35. Zhang F., Wang F., Wei X., Yang Y., Xu S., Deng D., Wang Y. Z. From trash to treasure: Chemical recycling and upcycling of commodity plastic waste to fuels, high-valued chemicals and advanced materials. *Journal of Energy Chemistry*. 2022. No. 69. P. 369–388.

36. Ragaert K., Delva L., Van Geem K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste management*. 2017. No. 69. P. 24–58.

37. Kim S. H., Kwak S. Y., Suzuki T. Photocatalytic degradation of flexible PVC/TiO₂ nanohybrid as an eco-friendly alternative to the current waste landfill and dioxin-emitting incineration of post-use PVC. *Polymer*. 2006. No. 47 (9). P. 3005–3016.

38. Zhang M., Buekens A., Jiang X., Li X. Dioxins and polyvinylchloride in combustion and fires. *Waste Management & Research*. 2015. No. 33 (7). P. 630–643.

SAVCHUK ANDRIY
Postgraduate student,
Department of Chemical Technology
and Resource Saving,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0005-2287-9030>
E-mail: Andriy.pvh@gmail.com

SOVA NADIYA
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department of Chemical Technology
and Resource Saving,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3550-6135>
Scopus Author ID: 56685569600
E-mail: djanc@ukr.net

SAVCHUK A. P., SOVA N. V.

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

POLYVINYL CHLORIDE PROCESSING IN A CYCLICAL ECONOMY

Purpose. *Determining the current state of PVC waste processing and finding ways to adapt PVC processing technologies to the current requirements of the circular economy.*

Methodology. *The methods of literary and systematic analysis of scientific publications on the subject of the study and generalization of the obtained research results were used.*

Findings. *The article considers the state of the art of PVC materials use and waste recycling in the world. The existing methods of producing polyvinyl chloride are analyzed and the possible applications of each type of typical formulation are presented. The main formulations of PVC compositions for the manufacture of rigid and soft products are considered. The influence of different types of additives on the performance properties of PVC products is described. The existing methods of processing PVC compositions into finished products are analyzed. Statistical data on the areas of application of PVC products in different countries are presented. A detailed analysis of the sources of polyvinyl chloride waste generation is carried out and their main characteristics are presented. The existing methods of processing various types of PVC waste are systematized. The advantages and disadvantages of existing technologies are analyzed. Modern approaches to the organization of polyvinyl chloride waste recycling processes are proposed.*

Originality. *The principles of polyvinyl chloride processing based on the principles of the circular economy are proposed.*

Practical value. *The data on the sources of polyvinyl chloride waste generation are systematized, and possible ways of their recycling are presented. The advantages and disadvantages of existing technologies and methods of PVC waste processing are analyzed. It is proposed to introduce a cyclic method of processing PVC waste by developing new and adjusting existing recipes for PVC compositions to increase the content of heat-stabilizing additives and the use of additives with prolonged effects.*

Keywords: *polyvinyl chloride; circular economy; recycling; polymeric waste.*