

АНАЛІЗ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОНЕНТІВ У ВІДХОДАХ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА ЕЛЕКТРОННОГО ОБЛАДНАННЯ

¹Вінницький національний технічний університет

У складі відходів електричного та електронного обладнання (ВЕЕО) значне місце займають полімерні компоненти. Щорічно в Україні утворюється близько 28 тис. тон ВЕЕО, при цьому частка пластика у них сягає 30 %. На сьогодні вміст полімерних компонентів у різних ВЕЕО залишається недостатньо вивченим. Метою цього дослідження є аналіз типів та обсягів полімерів у складі відходів електричного та електронного обладнання. Використання різних типів полімерів у складі відходів електричного та електронного обладнання досліджено в процесі аналізу літературних та відкритих джерел, зокрема і матеріалів виробників електричного та електронного обладнання. Також, за літературними даними та технічними даними виробників, проаналізовано вміст пластика в типових електричних та електронних приладах: моніторі, клавіатурі, комп'ютерній миші, фені, стаціонарному телефоні, фотоапараті, відеокамері, веб-камері, DVD-програвачі, телевізорі, мікрохвильовій печі. Всі з розглянутих пристроїв мають корпус з ABS-пластика. До того ж, кабель живлення всіх пристроїв виготовлений з полівінілхлориду. Також досить часто зустрічаються елементи з полікарбонату — частини екрану, об'єктиву. Інші типи полімерів, які ідентифіковані авторами у ВЕЕО, містять полібутилентерефталат, полістирол, поліпропілен і поліфенілен сульфід. При цьому, вміст полімерів у ВЕЕО сягає в середньому 50 % маси, а в деяких пристроях — до 60 %. Серед інших полімерів, які застосовуються у електричних та електронних пристроях, є ударостійкий полістирол, поліетилен, поліетилентерефталат, поліоксиметилен, стирол-акрилонітрил, поліамід, поліметилметакрилат, поліфеніленоксид, модифікований поліфеніленовий ефір, стирол-етилен-бутадієн-стирол (синтетичний каучук). Основною сферою застосування полімерів у електричному та електронному обладнанні є забезпечення електроізоляції. Проте, існують також полімери, які застосовуються як провідники та напівпровідники — поліанілін, поліацетилен, політіофен і поліфлуорен. Різноманітність типів полімерів у ВЕЕО підкреслює важливість розробки ефективних стратегій сортування та рециклінгу для забезпечення екологічно стійкого управління відходами. До того ж, аналіз показав потенціал повторного використання пластикових компонентів ВЕЕО в циркулярній економіці.

Ключові слова: полімери, полімерні відходи, відходи електричного та електронного обладнання, пластик, управління відходами.

Вступ

Відходи електричного та електронного обладнання (ВЕЕО) становлять значну частину відходів в сучасному світі і створюють серйозні проблеми для довкілля. У їхньому складі значне місце посідають полімерні компоненти, які часто складно переробляти, та вони можуть залишатися у навколишньому середовищі протягом десятиліть. Наукові дослідження з управління полімерними компонентами у ВЕЕО стають все важливішими у сучасному світі через зростання обсягів електроніки та пластика у відходах та їхній негативний вплив на довкілля. Результати таких досліджень можуть допомогти розробити ефективні стратегії управління відходами та сприяти сталому розвитку.

Щорічно в Україні утворюється близько 28 тис. тонн ВЕЕО, при цьому частка пластика в них сягає 30 % [1].

Аналіз літератури вказує на те, що існують значні проблеми у сфері управління полімерними компонентами ВЕЕО. Дослідження показують недостатню ефективність наявних систем сортування та переробки, а також великий обсяг пластикових відходів. Це вказує на необхідність розроблення нових стратегій та методів управління цими відходами.

До того ж, пластики ВЕЕО містять домішки та наповнювачі. Згідно з [2], [3], це можуть бути

небезпечні речовини — бромовані/хлоровані антипірени (для зменшення займистості), важкі метали (використовуються свинцеві стабілізатори і кадмієві пігменти), кольорові метали (мідь, цинк, нікель), дорогоцінні метали (паладій та срібло у пластику ноутбуків).

Відомо [4], [5], що найпоширенішими полімерними компонентами у ВЕЕО є АБС-пластик (38...42 %) і полістирол (42...43 %); значно менше використовуються поліпропілен, полікарбонат (відповідно 10...14 % і 1 %) та інші полімери. Це усереднені оцінки, однак тип пластика, який використовується, значно залежить від типу електричного чи електронного обладнання. Крім того, вміст полімерних компонентів у різних ВЕЕО залишається недостатньо вивченим. Ідентифікація типу пластика у ВЕЕО є важливою для розробки ефективних стратегій управління відходами та зменшення негативного впливу на екосистеми.

Метою дослідження є аналіз типів та обсягів полімерів у складі відходів електричного та електронного обладнання. Використання різних типів полімерів у складі відходів електричного та електронного обладнання досліджено в процесі аналізу літературних та відкритих джерел, зокрема і матеріалів виробників електричного та електронного обладнання. Також, за літературними даними та технічними даними виробників, проаналізовано вміст пластика у типових електричних та електронних приладах: моніторі, клавіатурі, комп'ютерній миші, фені, стаціонарному телефоні, фотоапараті, відеокамері, веб-камері, DVD-програвачі, телевізорі, мікрохвильовій печі

Результати дослідження

Аналіз типів полімерів, які використовуються у електричному та електронному обладнанні

У ВЕЕО можуть міститися різні типи пластиків, залежно від призначення та конструкції конкретного обладнання. Деякі з найпоширеніших типів пластиків, виявлені авторами у ВЕЕО, містять:

– акрилонітрил-бутадієн-стирол (ABS). Цей пластик широко використовується для виробництва корпусів комп'ютерів, моніторів, принтерів та іншого комп'ютерного обладнання, кухонних електроприладів та великої кількості іншого побутового обладнання;

– полівінілхлорид (PVC). PVC є досить гнучким, тому може бути використаний для оболонки кабелів, ізоляції дротів (до 60 % кабелів мають оболонку з PVC [6]). Стійкість PVC дозволяє застосовувати його в процесі виготовлення пластикових корпусів та інших компонентів. Жорсткий PVC широко використовується в кабелепроводах, електричних розподільних коробках;

– полістирол (PS). PS використовується для виготовлення корпусів, упаковки та ізоляційних матеріалів електронного обладнання;

– ударостійкий полістирол (HIPS). Це вид полістиролу, який відрізняється від звичайного полістиролу (PS) високою ударною міцністю. Цей матеріал часто використовується для виробництва корпусів приладів, які вимагають поєднання жорсткості та стійкості до ударів та вологи;

– поліетилен (PE). PE може використовуватись у вигляді упаковки, плівки або ізоляційних матеріалів. Зокрема, поліетиленова плівка застосовується для захисту електроприладів від статичної електрики, пилу, фізичних пошкоджень. Завдяки своїм діелектричним властивостям поліетилен використовується як ізоляційний матеріал для високовольтних кабелів, а завдяки стійкості до вологи, хімічних речовин, ультрафіолетового випромінювання, – для приладів, які використовуються поза приміщеннями (на відкритому повітрі);

– поліпропілен (PP). PP використовується для різноманітних деталей електронних пристроїв, включаючи корпуси та упаковку [7]. Оскільки поліпропілен є гарним діелектриком, він також застосовується в автоматичних вимикачах, конекторах, перемикачах, конденсаторах та інших електричних пристроях. Завдяки термічній стійкості PP також має застосування у пристроях світлодіодного освітлення;

– поліетилентерефталат (PET). PET застосовується в електронних пристроях для упаковки та ізоляції, до прикладу, як діелектричний шар у друкованих платах, в промисловій електроніці для кріплення рідкокристалічних дисплеїв [8]. Також PET використовується в гнучких електронних пристроях, зокрема дисплеях, електронному папері (технологія імітації звичайного чорнила), сонячних елементах, датчиках, портативній електроніці тощо. Так, наприклад, високоефективна електроніка, така як радіочастотні пристрої, з робочими частотами до 1 ГГц, який охоплює основну портативну електроніку, бездротовий зв'язок і пристрої передачі даних, розробляється та виготовляється на гнучких PET-підкладках [9];

– полікарбонат (PC). PC використовується у виробництві прозорих вставок, вікон і панелей у електронному обладнанні, рідкокристалічних і сенсорних екранів та корпусів комп'ютерів. Його

оптична прозорість і стійкість до деформацій роблять його ідеальним для цих застосувань, тому полікарбонат може забезпечувати чіткі та послідовні зображення та захищати внутрішні компоненти від пошкоджень;

– поліоксиметилен (POM), відомий також як поліформальдегід, є інженерним пластиком, який характеризується високою механічною міцністю, жорсткістю, твердістю та хімічною стійкістю. Цей матеріал може використовуватися для виготовлення електричних оболонок, ручок пристроїв, деталей для телефонів, радіоприймачів, магнітофонів, відеореєстраторів, телевізорів, комп'ютерів, факсимільних апаратів тощо. POM використовується також для тонкостінних роз'ємів, батарейних відсіків, розеток і невеликих корпусів, де необхідні жорсткі допуски. POM з низьким коефіцієнтом тертя також використовується у кнопках, циферблатах, повзунках та інших рухомих частинах електроніки;

– стирол-акрилонітрил (SAN). Це кополімер, що складається з мономерів стиролу і акрилонітрилу. SAN часто використовується як альтернатива акриловому склу або полікарбонату у виробництві частин приладів, для яких потрібна прозорість разом з високою міцністю. Завдяки своїй міцності та стійкості до ураження електричним струмом цей полімер широко використовується для виготовлення корпусів електронних пристроїв, таких як телефонні компоненти, корпуси батарей, кришки лічильників і крильчатки для кондиціонерів;

– поліамід (PA), також відомий як нейлон, є волокнистим або пластичним матеріалом і може використовуватися для виробництва широкого спектра виробів, таких як упаковка, електронні компоненти тощо. Поліамід є електричним ізолятором, може добре ковзати, що робить його незамінним для рухомих частин корпусів, таких як корпуси електроінструментів. Проте, PA не можна використовувати для корпусів, які потребують гідроізоляції, оскільки він не має такої здатності та може навіть поглинати вологу. До того ж, він нестійкий до дії спиртів і кислот, тому не використовується для корпусів, які потребують регулярного очищення;

– поліметилметакрилат (PMMA) — це полімер, який також відомий як оргскло. Завдяки своїм властивостям (прозорість, висока міцність, стійкість до дії хімічних речовин, простий в обробці) має широке застосування у LCD/LED екранах телевізорів, моніторів, смартфонів, дисплеях різних приладів. PMMA застосовується також в сонячних панелях як покрівельний матеріал через стійкість до ультрафіолетового випромінювання, а також у оптичних сенсорах та оптоелектронних пристроях [10]. Завдяки інфрачервоній прозорості цей полімер використовується у пультах дистанційного керування чи сканерах;

– поліфенілен сульфід (PPS). Завдяки стійкості до високих температур, високій міцності та жорсткості PPS забезпечує текучість і малий коефіцієнт стиснення для точного формування конекторів і розеток і часто застосовується для всіх методів пайки. PPS також використовується для виробництва жорстких дисків, корпусів електроніки, розеток, вимикачів та реле. Завдяки своїй низькій щільності, стійкості до корозії та гідролізу, PPS може використовуватися для виготовлення компонентів опалення та кондиціонування повітря, ручок кухонних приладів, решіток для фенів, клапанів для парових прасок, перемикачів для тостерів та сушильних апаратів, поворотних столів мікрохвильових печей тощо;

– полібутилентерефталат (PBT) — це термопластичний полімер, який належить до класу поліефірів. Завдяки своїй пластичності та термічній стійкості використовується, наприклад, у клавіатурах. Також, через великий електричний опір, PBT має застосування у багатьох електричних компонентах: вимикачах, розетках, волоконно-оптичних кабелях, роз'ємах, корпусах датчиків, гніздах для мікросхем, ізоляції трансформаторів тощо [11];

– поліфеніленоксид (PPO). Цей кристалічний термопластик є досить стійким до високої температури, що запобігає його деформації. До того ж, стійкість до тепла, води та електрики дозволяє його використовувати у виробництві корпусів з частим контактом з водою або пристроїв, які часто легко нагріваються. Проте, стійкість PPO до ультрафіолетового світла та окислення є низькою;

– модифікований поліфеніленовий ефір (PPE). PPE є сумішшю полістиролу і поліфеніленоксиду з поліпшеними механічними, тепловими та електричними властивостями. Він часто використовується для міцних і стійких корпусів, зокрема трансформаторів або реле, оскільки не піддається корозії і важко плавиться. Його переваги проявляються у разі значного впливу ультрафіолетового випромінювання. Але колір виробу при цьому стає тьмяним, тому для зовнішніх корпусів приладів його використовують не часто;

– стирол-етилен-бутадієн-стирол (синтетичний каучук, SEBS). Цей термопластичний еластомер є досить еластичним і гладким і тому використовується для виготовлення корпусів портативних

електронних та інших невеликих пристроїв (наприклад, іграшок). Цей матеріал не поглинає воду та тепло і захищає електроніку від хімічних речовин, зокрема мийних засобів та спирту. Однак SEBS є досить дорогим і тому його застосування є обмеженим.

З вищенаведеного очевидно, що основною сферою застосування полімерів у електричному та електронному обладнанні є забезпечення електроізоляції. Водночас, є також полімери, які застосовуються як провідники та напівпровідники. Провідні полімери складаються з довгого ланцюга повторюваних мономерів, легованих невеликою кількістю домішок, і мають здатність проводити електричний струм. З таких полімерів найчастіше використовується поліанілін (PANI) — у виробництві електронних пристроїв, таких як датчики, батареї та конденсатори. Інший електропровідний полімер — поліацетилен (PA) — використовується у виробництві електронних пристроїв, таких як транзистори та сонячні елементи. Серед напівпровідникових полімерів найширше використовуються політіофен (PT) і поліфлуорен (PF) у виробництві органічних світлодіодів, сонячних батарей і транзисторів.

Визначення вмісту полімерів у відходах електричного та електронного обладнання

У таблиці подані результати дослідження вмісту різних типів полімерів у 11 типових електричних та електронних пристроях.

Вміст різних типів полімерів у типових електричних та електронних пристроях

Пристрій	Ідентифіковані полімери	Загальна маса полімерів, г	Відсотковий вміст полімерів, %
Монітор	корпус: ABS	1200	50
	екран: PC		
	кабель: PVC		
Клавіатура	корпус: ABS	200	40
	клавіші: ABS, PBT		
	кабель: PVC		
Комп'ютерна миша	корпус: ABS	100	30
	кнопки: ABS, PBT		
	кабель: PVC		
Фен	корпус: ABS, PP	500	60
	вентилятор: PBT		
	кабель: PVC		
Стационарний телефон	корпус: ABS	250	45
	кнопки: ABS, PBT		
	кабель: PVC		
Фотоапарат	корпус: ABS, PC	300	55
	об'єктив: PC		
Відеокамера	корпус: ABS, PC	400	60
	об'єктив: PC		
Веб-камера	корпус: ABS	50	40
	об'єктив: PC		
	кабель: PVC		
DVD-програвач	корпус: ABS	350	50
	лоток: PS		
	кабель: PVC		
Телевізор	корпус: ABS	2500	40
	кабель: PVC		
Мікрохвильова піч	корпус: ABS	1000	50
	дверцята: PC		
	внутрішні елементи: PPS		

Таким чином, всі з досліджених пристроїв мають корпус з ABS-пластика. До того ж, у всіх пристроях є кабель живлення, який виготовлений із полівінілхлориду (PVC). Також досить часто зустрічаються елементи з полікарбонату (PC) — частини екрану, об'єктиву. Інші типи полімерів,

які були ідентифіковані авторами у ВЕЕО, містять полібутилентерефталат (PBT), полістирол (PS), поліпропілен (PP) і поліфенілен сульфід (PPS). При цьому, вміст полімерів у ВЕЕО сягає в середньому 50 % маси, а в деяких пристроях — до 60 %.

Висновки

Проведений аналіз підтверджує необхідність управління полімерними компонентами відходів електричного та електронного обладнання. Результати дослідження пластика показали, що у ВЕЕО зустрічаються різноманітні типи пластиків, зокрема ABS-пластик, полівінілхлорид, полікарбонат, поліпропілен, полістирол, а також синтетичні полімери, специфічні для електронної промисловості. Проте, різноманітність пластика у ВЕЕО є набагато більшою, якщо брати до уваги всі електричні та електронні пристрої, і охоплює понад 20 типів полімерів. Виявлено, що склад і вміст полімерів може значно варіюватися залежно від типу та призначення електронного пристрою. Різноманітність типів полімерів у ВЕЕО підкреслює важливість розробки ефективних стратегій сортування та рециклінгу для забезпечення екологічно стійкого управління відходами. До того ж, аналіз показав потенціал повторного використання пластикових компонентів ВЕЕО у циркулярній економіці. Застосування цих стратегій сприятиме зменшенню викидів пластикових відходів у довкілля та сприятиме створенню сталого способу виробництва та споживання електронних товарів. Отримані дані можуть бути основою для розробки стратегій управління відходами, включно з сортуванням, рециклінгом та повторним використанням полімерних компонентів ВЕЕО з метою зменшення негативного впливу на довкілля та підтримки принципів циркулярної економіки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Л. Ю. Главацька, «Аналіз системи поводження з відходами електричного та електронного обладнання в Україні,» *Ekologična bezpeka ta zbalansovane resursokoristuvannâ*, no. 1 (23), pp. 102-108, Jul. 2021, [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-1\(23\)-102-108](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-1(23)-102-108).
- [2] Л. Ю. Главацька, і В. А. Іщенко, «Аналіз складу компонентів електронних та електричних відходів,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №1, с. 42-48, 2021. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-154-1-42-48>.
- [3] T. G. Townsend, “Environmental Issues and Management Strategies for Waste Electronic and Electrical Equipment,” *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 61, no. 6, pp. 587-610, 2011, <https://doi.org/10.3155/1047-3289.61.6.587>.
- [4] M. Bigum, C. Petersen, T. H. Christensen, and C. Scheutz, “WEEE and portable batteries in residual household waste: Quantification and characterisation of misplaced waste,” *Waste Management*, vol. 33, no. 11, pp. 2372-2380, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.019>.
- [5] A. Ranskiy, et al. “Pyrolysis Processing of Polymer Waste Components of Electronic Products,” *Chemistry & Chemical Technology*, vol. 18, no. 1, pp. 103-108, 2024. <https://doi.org/10.23939/chcht18.01.103>.
- [6] R. Grigorescu, M. Grigore, L. Iancu,, P. Ghioca, and R. Ion, “Waste Electrical and Electronic Equipment: A Review on the Identification Methods for Polymeric Materials,” *Recycling*, vol. 4, no. 3, p. 32, 2019. <https://doi.org/10.3390/recycling4030032>.
- [7] P. A. Wäger, M. Schlupe, E. Müller, and R. Gloor, “RoHS regulated Substances in Mixed Plastics from Waste Electrical and Electronic Equipment,” *Environmental Science & Technology*, vol. 46, no. 2, pp. 628-635, 2011. <https://doi.org/10.1021/es202518n>.
- [8] L. Frisk, S. Lahokallio, J. Kiilunen, and K. Saarinen-Pulli, “Stability and properties of PET Films in Electronics Applications in Hygrothermal Environments,” *MRS Advances*, vol. 1, no. 51, pp. 3477-3482, 2016. <https://doi.org/10.1557/adv.2016.538>.
- [9] T. H. Chang, Y. H. Jung, D. Liu, H. Mi, J. Lee, and J. Gong, Z. Ma, “The applications of polyethylene terephthalate for RF flexible electronics,” in *Polyethylene Terephthalate: Uses, Properties and Degradation*, Barber, NA, Ed, 2017, pp. 103-153.
- [10] A. Hashim, A. Hadi, and N. A. H. Al-Aaraji, “Exploring the AC Electrical Properties of PMMA/SiC/CdS Nanocomposites to Use in Electronics Fields,” *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, т. 21, № 3, с. 553-559, 2023.
- [11] G. Choi, “Polybutylene Terephthalate (PBT),” *Engineering Plastics Handbook*, 2nd ed., McGraw-Hill, Blacklick, OH, USA, 2005, pp. 131-154.

Рекомендована кафедрою екології, хімії та технологій захисту довкілля ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 3.05.2024

Іщенко Віталій Анатолійович — канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля; e-mail: ischenko.v.a@vntu.edu.ua ;

Гречанюк Євгеній Володимирович — аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: grechanyuk@ukr.net .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

V. A. Ishchenko¹
Ye. V. Grechanyuk¹

Analysis of Polymer Components in Waste Electrical and Electronic Equipment

¹Vinnitsia National Technical University

Polymer components have a significant share in the composition of waste electrical and electronic equipment (WEEE). About 28,000 tons of WEEE are generated annually in Ukraine, with the share of plastic up to 30%. To date, the content of polymer components in various WEEE remains insufficiently studied. The purpose of this study is to analyze the types and volumes of polymers in waste electrical and electronic equipment. The use of different types of polymers in waste electrical and electronic equipment was studied through an analysis of literature and open sources, in particular materials of electrical and electronic equipment manufacturers. Also, based on literature and technical data of manufacturers, the content of plastic in typical electrical and electronic devices was analyzed: monitor, keyboard, computer mouse, hair dryer, landline phone, camera, video camera, web camera, DVD player, TV, microwave oven. All of the tested devices have a case made of ABS plastic. Besides, all devices with a power cable are made of polyvinyl chloride. Polycarbonate elements are also quite common: parts of the screen, lens. Other types of polymers identified by the authors in WEEE include polybutylene terephthalate, polystyrene, polypropylene, and polyphenylene sulfide. At the same time, the polymer content in WEEE reaches an average of 50 % by mass, and up to 60 % in some devices. Other polymers, used in electrical and electronic devices include high-impact polystyrene, polyethylene, polyethylene terephthalate, polyoxymethylene, styrene-acrylonitrile, polyamide, polymethyl methacrylate, polyphenylene oxide, modified polyphenylene ether, styrene-ethylene-butadiene-styrene (synthetic rubber). The main field of polymer application in electrical and electronic equipment is providing electrical insulation. However, there are also polymers used as conductors and semiconductors: polyaniline, polyacetylene, polythiophene and polyfluorene. The variety of polymer types in WEEE highlights the importance of developing effective sorting and recycling strategies to ensure environmentally sustainable waste management. Besides, the analysis highlights the potential for WEEE plastic components reuse in the circular economy.

Keywords: polymer, polymer waste, waste electrical and electronic equipment, plastic, waste management.

Ishchenko Vitalii A. — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: ischenko.v.a@vntu.edu.ua ;

Grechanyuk Evgeniy — Post-Graduate Student of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: grechanyuk@ukr.net