



Є. В. Гречаниук, В. А. Іщенко

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

ORCID <https://orcid.org/0009-0008-5687-2269> – Є. В. Гречаниук

<https://orcid.org/0000-0002-8464-1096> – В. А. Іщенко



ischenko.v.a@vntu.edu.ua

МОРФОЛОГІЧНИЙ СКЛАД ПОЛІМЕРНИХ КОМПОНЕНТІВ ЕЛЕКТРОННИХ ВІДХОДІВ

На сьогодні актуальним є рециклінг полімерів, в тому числі тих, які містяться у відходах електричного та електронного обладнання. Можливість і метод переробки полімерів залежить від їхнього складу і властивостей. Мета цього дослідження – проаналізувати на основі літературних даних склад основних полімерних компонентів електронних відходів, типові домішки та їх вплив на властивості матеріалів. У статті розглянуто хімічний склад полімерів, які застосовуються у електричному та електронному обладнанні, зокрема: акрилонітрил-бутадієн-стирол (ABS), полівінілхлорид (PVC), полістирол (PS), поліетилен (PE), поліпропілен (PP), поліетилентерефталат (PET), стирол-акрилонітрильна смола (SAN), полікарбонат (PC), поліуретан (PU), поліамід (PA), поліоксиметилен (POM), поліметилметакрилат (PMMA), полібутилентерефталат (PBT). Досліджено, що великі прилади і пристрої, монітори та телевізори старого зразка (з електронно-променевою трубкою) містять найменшу кількість різних полімерів – до 10 різних типів, тоді як у інших приладах кількість різних полімерів значно більша. Також проаналізовано типові домішки, що входять до складу кожного з цих полімерів: антиоксиданти, стабілізатори, пластифікатори, наповнювачі, барвники, модифікатори та залишкові мономери. Зокрема, серед домішок – ряд потенційно небезпечних речовин, що може викликати екологічні ризики при подальшому управлінні відходами електричного та електронного обладнання. Визначені недоліки, які можуть знизити продуктивність подальшої утилізації: відсутність ідентифікаційних знаків полімеру, використання декількох різних типів полімеру в одному типі обладнання, а також поєднання пластику та металу в обладнанні, що створює проблеми для переробки обох фракцій. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на розробку більш безпечних модифікацій полімерів та ефективних методів їх переробки.

Ключові слова: полімери, хімічний склад, електричне та електронне обладнання, електронні відходи, домішки.

E. V. Grechaniuk, V. A. Ishchenko

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

MORPHOLOGICAL COMPOSITION OF POLYMER COMPONENTS IN ELECTRONIC WASTE

Nowadays, the recycling of polymers, including those contained in waste electrical and electronic equipment, is relevant. The possibility and method of polymer recycling depend on their composition and properties. The purpose of this study is to analyse the composition of the main polymeric components of e-waste, typical impurities, and their impact on the properties of materials based on literature data. The article discusses the chemical composition of polymers used in electrical and electronic equipment, in particular acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS), polyvinyl chloride (PVC), polystyrene (PS), polyethylene (PE), polypropylene (PP), polyethylene terephthalate (PET), styrene-acrylonitrile resin (SAN), polycarbonate (PC), polyurethane (PU), polyamide (PA), polyoxymethylene (POM), polymethyl methacrylate (PMMA), polybutylene terephthalate (PBT). It is investigated that large appliances and devices, monitors, and TVs of the old model (with a cathode ray tube) contain the smallest number of different polymers - up to 10 different types, while in other devices the number of different polymers is much higher. Typical impurities included in the composition of each of these polymers are also analysed: antioxidants, stabilizers, plasticizers, fillers, dyes, modifiers, and residual monomers. In particular, the impurities include several potentially hazardous substances that can cause environmental risks in the further management of waste electrical and electronic equipment. We have identified shortcomings that can reduce the productivity of further recycling: the lack of polymer identification marks, the use of several different types of polymers in one type of equipment, and the combination of plastic and metal in the equipment, which creates problems for the recycling of both fractions. Further research should be aimed at developing safer polymer modifications and efficient methods of recycling.

Keywords: polymers, chemical composition, electrical and electronic equipment, e-waste, impurities.

Вступ

Полімерні матеріали відіграють одну з ключових ролей у сучасному світі, оскільки широко застосовуються у безлічі галузей: від повсякденних предметів (упаковки та текстилю) до високотехнологічних рішень (будівництва та електроніки) [1]. Їхні унікальні властивості, такі як легкість, міцність, гнучкість та стійкість до хімічних впливів, роблять їх незамінними в багатьох сферах. Однак, для забезпечення оптимальних характеристик та безпеки використання необхідно глибоко розуміти хімічний склад цих матеріалів [2,3].

Полімерні матеріали у значній кількості застосовуються у електричних та електронних пристроях і приладах. Зокрема, найпоширенішими є акрилонітрил-бутадієн-стирол (ABS), полівінілхлорид (PVC), полістирол (PS), поліетилен (PE), поліпропілен (PP), поліетилен-терефталат (PET), полікарбонат (PC), стиrol-акрилонітрильна смола (SAN), поліуретан (PU), поліамід (PA) [4,5,6]. Більше того, у багатьох пристроях більша частина їх маси припадає якраз на полімерні компоненти. Їхні властивості можуть суттєво змінюватися залежно від хімічного складу та наявності домішок. Типові домішки, що входять до складу цих полімерів – це антиоксиданти, стабілізатори, пластифікатори, наповнювачі та залишкові мономерні. Кожен з цих компонентів відіграє важливу роль у поліпшенні властивостей полімерів, таких як термічна стабільність, захист від ультрафіолетового випромінювання, гнучкість та механічна міцність.

У зв'язку із значним зростанням обсягів відходів, і зокрема відходів електричного та електронного обладнання, збільшується і обсяг полімерів у відходах. В свою чергу, зростаюча кількість електронних пристроїв збільшує потребу у відповідних полімерах. У контексті циркулярної економіки і необхідності зменшувати використання первинних ресурсів (нафти) для виробництва полімерів, актуальним є рециклінг полімерів, в тому числі тих, які містяться у відходах електричного та електронного обладнання. Варто зазначити, що від складу і властивостей полімерів залежить можливість і вибір методу їх переробки.

При цьому, існує декілька методів дослідження хімічного складу полімерів:

1. Газова хроматографія: цей метод використовується для ідентифікації та кількісного визначення летких органічних сполук в полімерах, наприклад залишкових мономерів (стиролу, вінілхлориду, етилену, пропілену, етиленгліколю, фосгену).

2. Інфрачервона спектроскопія: цей метод використовується для ідентифікації функціональ-

них груп полімерів, таких як карбонільні групи, аміногрупи та ароматичні кільця ABS-пластику, карбонільні групи, хлоридні групи та вінільні групи полівінілхлориду і полістиролу, метильні та етильні групи поліетилену і поліпропілену, карбонільні групи, етильні (фенольні) групи та ароматичні кільця поліетилентерефталату (полі-карбонату).

3. Ядерно-магнітно-резонансна спектроскопія: цей метод використовується для ідентифікації та кількісного визначення різних атомів полімерів, таких як атоми водню та вуглецю.

4. Термогравіметричний аналіз: цей метод використовується для дослідження термічного розкладання полімерів та визначення їх термостійкості.

Мета цього дослідження – проаналізувати на основі літературних даних склад основних полімерних компонентів електронних відходів, типові домішки та їх вплив на властивості матеріалів. Розуміння складу та можливих домішок є важливим для безпечної утилізації відходів електричного та електронного обладнання та оцінки потенціалу рециклінгу полімерних матеріалів.

Методи дослідження

Для виявлення основних полімерних компонентів, які застосовуються у електричному та електронному обладнанні, та дослідження їх складу був проведений візуальний аналіз різних відходів електричного та електронного обладнання (ВЕЕО), накопичених авторами та зібраних у Вінницькому національному технічному університеті (всього понад 50 одиниць). Крім того, було проведено літературний пошук характеристик компонентів електричного та електронного обладнання та проаналізовані різні сфери застосування полімерів. Для аналізу використано дані з наукових публікацій, патентів та технічних звітів за 2010–2024 роки. Теоретичний аналіз домішок, наявних у різних полімерах, проведено з використанням літературних даних та баз даних, які є у вільному доступі.

Результати дослідження та обговорення

При дослідженні складу полімерів які містяться у відходах електричного та електронного обладнання (ВЕЕО), важливим є врахування різноманітності полімерів. Так, великі прилади і пристрої, монітори та телевізори старого зразка (з електронно-променевою трубкою) мають найменшу кількість різних полімерів – до 10 різних типів, тоді як для інших приладів кількість різних полімерів значно більша. Наприклад, у деяких дрібних пристроях виявлено 21 вид полімерів. Також необхідно розуміти, що лише частина полімерів може бути відносно легко відокремлена. В охолоджувальних приладах частина пластику (6%) присутня в елементах, які можна

вилучити вручну, а решту (4,4%) можна отримати лише після подрібнення [5]. У випадку принтерів та копіювальної техніки полімерні компоненти з'єднані з металами, що унеможлиблює отримання чистої фракції пластику. Полімери не завжди легко ідентифікувати. Наприклад, у дослідженні [5] у моніторах з електронно-променевою трубкою лише 25% полімерних деталей мали позначку полімеру; для телевізорів з електронно-променевою трубкою цей показник дещо вищий – 58%. Відсутність позначки полімеру ускладнює його ідентифікацію, що, в свою чергу, накладає обмеження на ручне сортування таких приладів / пристроїв.

На основі аналізу літературних даних [5, 6, 12] встановлено, що полімери, такі як ABS та

PVC, часто потребують попередньої сепарації перед переробкою. Наприклад, у роботі [9] показано, що комбінація мікрохвильової обробки та флотації дозволяє досягти 100% чистоти розділення цих полімерів. Економічна оцінка таких методів є перспективним напрямком для подальших досліджень.

Стосовно наявності кольорових домішок, то наявність темного кольору ускладнює ідентифікацію полімеру, якщо відсутня позначка полімеру. Полімери темного кольору найчастіше зустрічаються у старих телевізорах з електронно-променевою трубкою (73%) і невеликих ВЕЕО (22%), з різними типами полімерів. Наприклад, у процесорі основною частиною, яка складається з темного пластику, є внутрішній вентиляційний отвір.

Таблиця 1

Основні типи полімерів у ВЕЕО, їхні властивості, умови переробки та застосування [6, 14, 21, 22]

Полімер	Властивості	Умови переробки	Застосування
ABS (Акрилонітрил-бутадиєн-стирол)	Легкість, ударостійкість, термостійкість, стійкість до деформації	Механічна переробка (лиття, екструзія), потребує стабілізаторів (ВНТ, Irganox 168)	Корпуси електроніки, телефонні компоненти, автомобільні деталі
PVC (Полівінілхлорид)	Жорсткість, хімічна стійкість, вогнестійкість (завдяки хлору)	Механічні та хімічні методи; не рекомендується піроліз через токсичні викиди (HCl).	Труби, ізоляція кабелів, упаковка
PS (Полістирол)	Крихкість, легкість, оптична прозорість	Механічна, хімічна та термічна переробка; HIPS можна переробляти до 9 циклів	Одноразовий посуд, упаковка, ізоляційні матеріали
PE (Поліетилен)	Гнучкість, стійкість до вологи, низька вартість	Механічна переробка (екструзія), розчинення/осадження	Плівки, пакети, труби, іграшки
PP (Поліпропілен)	Жорсткість, стійкість до хімічних речовин, високий модуль пружності	Механічна переробка, техніка розчинення/осадження	Автокомпоненти, упаковка, медичні вироби
PET (Поліетилентерефталат)	Міцність, термостійкість, бар'єр для газів	Механічна та хімічна переробка (гідроліз)	Пляшки, текстильні волокна, електронні компоненти
PC (Полікарбонат)	Ударостійкість, оптична прозорість, висока температура плавлення	Пряма переробка, хімічні методи (деполімеризація)	Диски, лінзи, бронескло, корпуси приладів
PMMA (Поліметилметакрилат)	Прозорість, біосумісність, стійкість до УФ	Механічна переробка, розчинення	Лінзи, дисплеї, освітлювальні прилади

Для ефективного відділення цих полімерів необхідно вибрати оптимальні методи ідентифікації (Таблиця 2).

Таблиця 2

Методи ідентифікації полімерів у ВЕЕО: порівняльний аналіз [23-26]

Метод	Принцип дії	Переваги	Недоліки	Вартість
Символьні коди (RIC)	Візуальне розпізнавання за маркуванням (наприклад, ♻️ для PET, ♻️ для PP)	Простота, швидкість ідентифікації	Не завжди присутнє на виробі; не підходить для забруднених або пошкоджених матеріалів	Дуже низька
FTIR-спектроскопія	Аналіз інфрачервоних спектрів поглинання функціональних груп полімерів	Висока точність, можливість аналізу сумішей, швидкість (1–2 хв на зразок)	Вимагає підготовки зразків; складність при аналізі темних кольорових пластиків	Середня (обладнання)
Термогравіметричний аналіз (TGA)	Вимірювання зміни маси зразка при нагріванні для визначення температур розкладання	Визначає термостійкість, домішки; підходить для сумішей	Не ідентифікує конкретні полімери без додаткових методів (наприклад, DSC)	Висока
Горючий тест	Спостереження за кольором полум'я, запахом та димом при згорянні зразка	Не вимагає спеціального обладнання; швидкий	Суб'єктивність; небезпека токсичних викидів (наприклад, для PVC)	Низька
Метод флоатації	Розділення полімерів за густиною в рідинах (наприклад, вода, спиртові розчини)	Ефективність для сумішей (наприклад, PET/PVC)	Обмежена точність для полімерів з близькою густиною (наприклад, ABS/PS)	Середня (реагенти)
DSC (Диференційна скануюча калориметрія)	Вимірювання теплових ефектів (T _g , T _m) для ідентифікації полімерів	Визначає термічні властивості; підходить для кристалічних полімерів (наприклад, PE, PP)	Вимагає малих розмірів зразка (1–10 мг); висока вартість обладнання	Висока

Нижче проаналізовано хімічний склад полімерів, які найчастіше зустрічаються у ВЕЕО.

Акрилонітрил-бутадієн-стирол (ABS)

ABS – аморфний термопластичний полімер, який масово виробляється з 1960-х років завдяки своїй легкості, ударостійкості та стабільності розмірів, міцності, в'язкості і стійкості до деформації при нагріванні. Хімічна формула ABS: $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$, де пропорції залежать від співвідношення трьох основних компонентів (стирол – від 54% до 63%,

акрилонітрил – від 21% до 27%, бутадієн – від 12% до 25%) [6]. ABS використовується в телефонних компонентах, електронних корпусах, корпусах комп'ютерів, мікрохвильових печах та в автомобільних компонентах. Дослідження [7] свідчать про те, що вироби, отримані з ABS, переробленого термо-механічними методами (лиття під тиском, екструзія та формування), мають нижчі фізико-механічні властивості, особливо ударну в'язкість, порівняно з первинним ABS через деградацію полібутадієну в

присутності антипіренів, як під час експлуатації виробів, так і під час термічної обробки. Варто зазначити, що хоча механічні властивості знижуються (в першу чергу, зменшується ударна в'язкість), ці показники все ще залишаються високими, тому відновлений ABS можна використовувати повторно шляхом покращення фізико-механічних властивостей за допомогою різних методів та домішок. Оскільки деградація ABS під час експлуатації виробів та термічної переробки призводить до витрат стабілізаторів, необхідно стабілізувати відновлений ABS новими антиоксидантами (часто застосовується бутильований гідрокситолуол (BHT), Irganox 168 та 2,4-ди-трет-бутилфенол [8]. Крім того, ABS широко використовується в комбінації з іншими полімерами, такими як полікарбонат (PC) – у побутових приладах (наприклад, чайниках і бритвах), полівінілхлорид (PVC) – у посудомийних машинах. Це ускладнює подальше сортування і переробку. Однак, наприклад, суміш ABS/PVC можна розділити за допомогою мікрохвильової та/або м'якої теплової обробки. У дослідженні [9] показано, що мікро-хвильова обробка після покриття пластику порошкоподібним активованим вугіллям підвищила гідрофільність поверхні PVC і полегшила його відділення. Крім того, обробка м'яким теплом сприяє селективному розділенню зі 100% вилученням і чистотою. Інший приклад – часткова змішуваність ABS і PC стала передумовою для можливості переробки суміші полімерів. Для отримання композитів ABS/PC (70%:30%) з аналогічною або вищою ударною в'язкістю, ніж у первинного ABS, необхідно використовувати спеціальні речовини-компатибілізатори (забезпечують сумісність): ABS-g-MA, PP-g-MA, SEBS-g-MA, EVA-g-MA [10].

Полівінілхлорид (PVC)

PVC – це жорсткий та міцний термопластичний полімер, відомий своєю стійкістю до дії хімічних речовин, води та вогню. Полівінілхлорид є полімером, що утворюється в результаті полімеризації вінілхлориду $\text{CH}_2=\text{CHCl}$. Цей полімер має аморфну структуру з полярними атомами хлору в молекулярній структурі. Через високий вміст хлору (близько 56% від маси полімеру) переробка PVC складніша, ніж інших полімерів ВЕЕО, що містять бромовані антипірени [11]. З усіх відомих методів переробки прийнятними є механічні та хімічні методи. В той же час, спалювання та піроліз не рекомендуються через утворення великої кількості HCl та інших токсичних продуктів.

Полістирол (PS)

PS – це жорсткий та крихкий термопластичний полімер, відомий своєю стійкістю до

хімічних речовин, води та вологи. Основним компонентом PS є полімеризований стирол $(\text{C}_6\text{H}_5\text{CHCH}_2)_n$. Переробка полістиролу може здійснюватися механічними, хімічними та термічними методами. Різновид PS – ударостійкий полістирол (HIPS) – це двофазна полімерна система, в якій гумова фаза включена в полістирол, що сприяє покращенню розтягнення та міцності. Найбільш поширені HIPS містять 3–10% полібутадієну, а присутність оклюзій PS збільшує об'ємну частку армуючої гумової фракції на 10–40%. Він використовується у виробках, які не потребують високої ударостійкості (HIPS має нижчу ударостійкість, ніж інші полімери – наприклад, ABS), – компонентах холодильників (поліці, вкладиші), дрібній побутовій техніці, принтерах, телекомунікаційному обладнанні, моніторах, комп'ютерах, іграшках тощо. Ударостійкий полістирол є перспективним матеріалом для механічної переробки, оскільки його властивості не зазнають значних змін навіть після багаторазової переробки до дев'яти циклів.

Поліетилен (PE)

PE – це термопластичний полімер, що складається з довгих ланцюгів мономерів етилену $(-\text{CH}_2-)_n$, де його структура визначає широкий спектр властивостей, від гнучкості до жорсткості, залежно від ступеня кристалічності та щільності, що варіюються від низькощільного (LDPE) до високощільного (HDPE) та лінійного низькощільного (LLDPE), кожен з яких має унікальні характеристики та застосування, від пакувальних матеріалів до будівельних труб та медичних імплантатів, завдяки його хімічній стійкості, механічній міцності та електроізоляційним властивостям.

Поліпропілен (PP)

PP – це жорсткий та міцний термопластичний полімер, відомий своєю стійкістю до дії хімічних речовин, води та жирів. PP складається з одного основного компоненту – поліпропілену $(-\text{CH}(\text{CH}_3)-)_n$. Цей полімер можна переробити механічним шляхом, що є простим і дешевим методом, а також за допомогою техніки розчинення / повторного осадження (пряма переробка). Наприклад, у дослідженні [12] повідомлялося, що за допомогою техніки розчинення / повторного осадження властивості перероблених полімерів не мають суттєвих відмінностей від вихідного матеріалу.

Поліетилентерефталат (PET)

PET – це жорсткий та міцний термопластичний полімер, що характеризується стійкістю до дії хімічних речовин, води та газів. Він складається з етиленгліколю $(\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2)$, що надає йому гнучкість, та терефталевої кислоти $(\text{C}_8\text{H}_6\text{O}_4)$, яка забезпечує жорсткість і міцність. PET має

оптимальні властивості, такі як термостійкість, стабільність розмірів, оптичні та механічні характеристики, а також можливість легкого виробництва з різними варіантами забарвлення. Він є абсолютно придатним для вторинної переробки. Дослідження підтверджують безпеку повторного використання PET завдяки замкненому циклу переробки [13] – насамперед, механічним та хімічним способами. Для виявлення забруднень у перероблених зразках PET застосовуються різні методи. Наприклад, полімерні забруднення можна визначити за допомогою термічного аналізу, зокрема диференційної скануючої калориметрії (ДСК), яка є ефективною для композиційного аналізу при концентрації забруднень від 1% мас. Для нижчих концентрацій рекомендується використовувати ДСК у поєднанні з іншими методами, такими як відпалювання матеріалу при високих температурах та ІЧ-Фур'є спектроскопія [4].

Полікарбонат (PC)

PC – це жорсткий та міцний термопластичний полімер, що характеризується високою стійкістю до ударів, дії хімічних речовин, тепла та вогню. Він синтезується з бісфенолу А (BPA), який забезпечує жорсткість, міцність та хімічну стійкість, та фосгену (COCl_2), що надає полімеру ударостійкості, термостійкості та вогнестійкості. PC має унікальні властивості, такі як оптична прозорість, висока температура теплової деформації та міцність. Однак, його в'язкість може знижуватися в виробках значної товщини або при низьких температурах. Крім того, фізичне старіння нижче температури склування призводить до підвищення крихкості [14]. Для покращення механічних властивостей PC застосовують армуючі матеріали або змішують його з іншими термопластичними полімерами. PC можна переробляти трьома основними способами: пряма переробка (полімер відокремлюється від супутніх забруднювачів і може бути легко перероблений за допомогою звичайних методів екструзії розплаву або розчинення / осадження), переробка хімічними методами (полімер хімічно перетворюється на мономери або частково деполімеризується до олігомерів) та термохімічна переробка (піроліз).

Стирол-акрилонітрильна смола (SAN)

SAN – це аморфний термопластичний сополімер стиролу (C_8H_8) та акрилонітрилу ($\text{C}_3\text{H}_3\text{N}$), його хімічна формула – $(\text{C}_8\text{H}_8)_x(\text{C}_3\text{H}_3\text{N})_y$, де x і y визначають співвідношення мономерів (зазвичай 70–80% стиролу та 20–30% акрилонітрилу). SAN демонструє високу стійкість до впливу вуглеводнів, масел та розбавлених кислот, а також має хороші механічні властивості, включаючи жорсткість та стійкість до ударів, що забезпечує його

широке застосування в галузях, де потрібна комбінація прозорості, міцності та хімічної стійкості, таких як виробництво автомобільних компонентів, корпусів електронних пристроїв та пакувальних матеріалів, де його здатність зберігати прозорість та міцність протягом тривалого часу є ключовою перевагою.

Поліуретан (PU)

PU – це універсальний полімер зі структурною формулою $\text{R}-\text{NH}-\text{COO}-\text{R}'$ (R – залишок ізоціанату, R' – залишок поліолу), що охоплює широкий спектр матеріалів з різноманітними властивостями, від м'яких еластомерів до жорстких пластиків, завдяки своїй здатності до формування різноманітних структур шляхом реакції поліолів з ізоціанатами, що дає можливість отримувати матеріали з регульованими механічними, тепловими та хімічними характеристиками. PU демонструє відмінну стійкість до стирання, ударів та хімічних речовин, а також може бути модифікований для забезпечення високої теплоізоляції, звукоізоляції та вогнестійкості, що робить його незамінним у багатьох галузях, включаючи будівництво (ізоляційні матеріали, герметики), автомобільну промисловість (сидіння, панелі приладів), меблеву промисловість (матраци, подушки), виробництво взуття (підшви), а також у медицині (імплантати, протези), де його біосумісність та здатність до формування складних форм є критично важливими.

Поліамід (PA)

PA – це кристалічний полімер, що містить амідні ($-\text{CONH}-$) групи у головному ланцюзі і утворюється в результаті конденсації діаміну та дикислоти. Цей полімер також відомий як нейлон, існує кілька його типів: PA6 $[-\text{NH}-(\text{CH}_2)_5-\text{CO}-]_n$, PA66 $[-\text{NH}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_4-\text{CO}-]_n$ та PA610 $[-\text{NH}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_8-\text{CO}-]_n$. Числові суфікси вказують на кількість атомів вуглецю, присутніх у молекулярних структурах кислоти та аміну. PA використовується в багатьох електронних пристроях – центральних процесорах, контакторах, клемних блоках та іншому дрібному електричному обладнанні.

Поліоксиметилен (POM)

POM, також відомий як ацеталь, поліформальдегід або поліацеталь, є термопластичним полімером, що складається з повторюваних оксиметиленових ($-\text{CH}_2-\text{O}-$) ланок і отримується полімеризацією формальдегіду (CH_2O). Його гомополімерна структура представлена формулою $(-\text{CH}_2-\text{O}-)_n$, тоді як у сополімерній структурі можуть бути присутні додаткові етери для покращення стабільності, зокрема фрагменти типу $(-\text{CH}_2-\text{O}-)_n(-\text{R}-\text{O}-)_m$, де R – стабілізуючі групи, наприклад, етиленоксидні. Його частка на

ринку полімерів становить близько 5%. Цей полімер використовується в компонентах з високою жорсткістю, низьким коефіцієнтом тертя та стабільністю розмірів, наприклад, у деталях для електронних пристроїв (телевізори та телефони).

Поліметилметакрилат (PMMA)

PMMA – це нерозкладний поліакрилат, що характеризується біосумісністю та регульованими механічними та оптичними властивостями (шляхом зміни співвідношення мономера та ініціатора під час полімеризації) [15]. Він також відомий як органічне скло (плексиглас, акрил, Perspex, Plexiglas, Lucite), отримується шляхом полімеризації метилметакрилату (MMA, C₅H₈O₂), з повторюваною структурною ланкою $[-CH_2-C(CH_3)(COOCH_3)-]_n$. Основною сферою його застосування є LCD-монітори, але також існують спеціалізовані продукти для інших застосувань у галузі освітлення.

Полібутилентерефталат (PBT)

PBT – це термопластичний поліестер, що утворюється внаслідок поліконденсації терефталевої кислоти (C₈H₆O₄) або її диметилового ефіру з 1,4-бутандіолом (C₄H₁₀O₂), утворюючи повторювану структурну ланку $[-O-(CH_2)_4-O-CO-C_6H_4-CO-]_n$. Терефталева кислота забезпечує жорсткість і термостійкість полімеру, тоді як 1,4-бутандіол додає гнучкості та ударостійкості. PBT характеризується поєднанням механічних та електричних властивостей, що забезпечують його широке застосування в електричних та електронних пристроях, завдяки здатності до легкого формування, швидкій кристалізації, високій стабільності розмірів, а також стійкості до хімічних речовин та впливу вологи, що робить його ідеальним матеріалом для виробництва компонентів, що потребують високої точності та надійності в умовах експлуатації з різними навантаженнями та температурами.

Більшість із наведених полімерів містять типові домішки [16–21], зокрема:

1. Стабілізатори тепла (запобігають розкладанню полімерів під дією тепла). Вони можуть включати: металеві мила (стеарати кальцію або цинку), органічні фосфіти (трис(2,4-ди-трет-бутилфеніл)фосфіт), фосфоніти та фосфати.

2. УФ-стабілізатори (захищають полімери від руйнівного впливу ультрафіолетового випромінювання). Вони можуть включати: бензотріазоли, бензофенони, хімічні поглиначі УФ-випромінювання (2-(2-гідроксифеніл) бензотриазол), світлостабілізатори HALS – хімічні стабілізатори з гідроксифенілалкілімідазолом.

3. Антиоксиданти (захищають полімери від окиснення). Це, зокрема, можуть бути фенольні антиоксиданти (бутильований гідроксианізол

(BHA), бутильований гідрокситолуол (BHT)), фосфітні антиоксиданти.

4. Пластифікатори (роблять полімери м'якшими та гнучкішими). Вони можуть включати: фталати (діоктилфталат, дибутилфталат), епоксидовані масла (епоксидована соєва олія), поліетиленгліколі. Варто зазначити, що пластифікатори не використовуються у поліпропілені.

5. Наповнювачі (здешевлюють полімери та покращують їх механічні властивості). Вони можуть включати: кальцій карбонат, тальк, скловолокно, кремнієву кислоту, барит.

6. Барвники (надають полімерам бажаного кольору). Вони можуть включати: органічні барвники, неорганічні пігменти (наприклад, TiO₂, ZnO, Cr₂O₃, Fe₂O₃, Cd).

7. Модифікатори: покращують стійкість полімерів до ударів, горіння, дії хімічних речовин. Вони можуть включати: акрилові модифікатори ударної в'язкості, модифікатори для покращення переробки (метакрилати), антипірени (трикрезилфосфат, бромовані органічні сполуки у поєднанні із Sb₂O₃, поліхлоровані біфеніли).

Крім того, в полівінілхлориді і поліетилені додатково використовуються оловоорганічні сполуки (дибутилдилаурат олова) як стабілізатори тепла. У поліпропілені додатково застосовуються органічні пероксиди (як стабілізатори тепла), еластомери – етилен-пропіленовий каучук (EPR), етилен-вініл-ацетат (EVA), антипірени – гідроксид алюмінію, трикрезилфосфат, акрилові сополімери і термоеластоласти (як модифікатори). У полікарбонаті також використовуються адипати (діоктил адипат (DOA)) як пластифікатори.

Що стосується потенційної наявності антипіренів, то лише монітори з електронно-променевою трубкою, копіювальне обладнання та принтери мають відповідне маркування. При ручному сортуванні, яке часто застосовується при утилізації ВЕЕО, наявність маркування є дуже важливою для ідентифікації полімерів та домішок.

З точки зору подальшої утилізації, на підприємствах, де основним процесом є ручний демонтаж, є кілька недоліків, які можуть знизити продуктивність утилізації: відсутність ідентифікаційних знаків полімеру, використання декількох різних типів полімеру в одному типі обладнання, а також поєднання пластику та металу в обладнанні, що створює проблеми для переробки обох фракцій. Сучасні сортувальні пристрої не здатні досягти необхідного рівня розділення та/або видалення забруднювачів, а це означає, що ці переробні установки виробляють продукцію низької якості.

Висновки

Дослідження хімічного складу полімерних компонентів у відходах електричного та

електронного обладнання має важливе значення для розуміння їхніх фізико-хімічних властивостей та поведінки при переробці. У електричному та електронному обладнанні міститься велика кількість різних полімерів, а часто – і їх суміші. Результати аналізу свідчать про те, що ці полімери електронних відходів включають широкий спектр домішок, таких як стабілізатори, пластифікатори, наповнювачі, барвники та модифікатори, що безпосередньо впливають на їх характеристики, створюють потенційну небезпеку забруднення довкілля при неналежному поводженні полімерами та ризики при переробці. Важливим аспектом є екологічна безпека цих полімерів, оскільки їх складові можуть містити токсичні речовини, що виділяються в процесі експлуатації або утилізації. Тому подальші дослідження повинні бути спрямовані на розробку більш безпечних модифікацій полімерів та ефективних методів їх переробки. Отримані результати підкреслюють необхідність подальших експериментальних досліджень для кількісної оцінки ефективності переробки полімерів електронних відходів, зокрема з урахуванням економічних аспектів. Загалом, отримані результати сприяють покращенню знань про хімічний склад та властивості полімерних матеріалів, що є важливим для їх подальшого вдосконалення, підвищення експлуатаційних характеристик та зменшення екологічного впливу.

Список літератури:

1. Гречанюк Є.В., Іщенко В.А. Дослідження пластику в електронних відходах. *Комплексне використання ресурсів довкілля* : збірник матеріалів І Всеукраїнської науково-практичної конференції, Луцьк, 20 листопада 2023 р. Луцьк, 2023. – С. 18-20.
2. Главацька Л. Ю. Аналіз системи поводження з відходами електричного та електронного обладнання в Україні. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2021. № 1. С. 102-108.
3. Гречанюк Є.В., Іщенко В.А. Аналіз пластику у відходах електричного та електронного обладнання : матеріали ЛІІІ Науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 20-22.03.2024 р. URL: conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2024/paper/view/20469/16979
4. Vilaplana F., Karlsson, S. Quality concepts for the improved use of recycled polymeric materials: a review. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2008. 293(4). P. 274-297.
5. Martinho G., Pires A., Saraiva L., Ribeiro R. Composition of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE) by direct sampling. *Waste Management*. 2012. 32(6). P. 1213-1217.
6. Grigorescu R. M., Grigore M. E., Iancu L., Ghioca P., Ion, R. M. Waste electrical and electronic equipment: A review on the identification methods for polymeric materials. *Recycling*. 2019. 4(3), P. 32.
7. García M. D. G. T., Schlatter M., Cabrera F. M., Manzanares J. T., Hanafi, I. Recycling of acrylonitrile-butadiene-styrene using injection moulding machine. *Procedia Technology*. 2016. 22, P. 399-406.
8. Bai X., Stein B. K., Smith K., Isaac D. H. Effects of reprocessing on additives in ABS plastics, detected by gas chromatography/mass spectrometry. *Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology*. 2012. 28(1), P. 1-14.
9. Thanh Truc N. T., Lee B. K. Sustainable and selective separation of PVC and ABS from a WEEE plastic mixture using microwave and/or mild-heat treatment with froth flotation. *Environmental science & technology*. 2016. 50(19). P. 10580-10587.
10. Barthes M. L., Mantaux O., Pedros M., Lacoste E., Dumon M. Recycling of aged ABS from real WEEE through ABS/PC blends in the ABS- rich compositions. *Advances in Polymer Technology*. 2012. 31(4). P. 343-353.
11. Sadat-Shojai M., Bakhshandeh G. R. Recycling of PVC wastes. *Polymer degradation and stability*. 2011. 96(4). P. 404-415.
12. Poulakis J. G., Papaspyrides C. D. Recycling of polypropylene by the dissolution/precipitation technique: I. A model study. *Resources, conservation and recycling*. 1997. 20(1). P. 31-41.
13. Hopewell J., Dvorak R., Kosior E. Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2009. 364(1526). P. 2115-2126.
14. Kayano Y., Keskkula H., Paul D. R. Effect of polycarbonate molecular weight and processing conditions on mechanical behaviour of blends with a core-shell impact modifier. *Polymer*. 1996. 37(20). P. 4505-4518.
15. Samavedi S., Poindexter L. K., Van Dyke M., Goldstein A. S. Synthetic biomaterials for regenerative medicine applications. In: *Regenerative medicine applications in organ transplantation*. Academic Press, 2014. P. 81-99.
16. Van Krevelen D.W., Te Nijenhuis K. Properties of Polymers: Their Correlation with Chemical Structure; their Numerical Estimation and Prediction from Additive Group Contributions. 4th ed. Elsevier, 2009.
17. Seymour R.B., Carraher C.E. Polymer Chemistry: An Introduction. 6th ed. Marcel Dekker, 2003.
18. Callister W.D., Rethwisch D.G. Materials Science and Engineering: An Introduction. 10th ed. Wiley, 2018.

19. Dimitrakakis E., Janz A., Bilitewski B., Gidaracos E. Small WEEE: determining recyclables and hazardous substances in plastics. *Journal of hazardous materials*. 2009. 161(2-3). P. 913-919.
20. Erickson M. D., Kaley R. G. Applications of polychlorinated biphenyls. *Environmental Science and Pollution Research*. 2011. 18. P. 135-151.
21. Schlummer M., Gruber L., Mäurer A., Wolz G., Van Eldik R. Characterisation of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) and implications for waste management. *Chemosphere*. 2007. 67(9). P. 1866-1876.
22. Buekens A., Yang J. Recycling of WEEE plastics: A review. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2014. 16. P. 415-434.
23. Maris E., Botané P., Wavrer P., Froelich D. Characterizing plastics originating from WEEE: A case study in France. *Minerals Engineering*. 2015. 76. P. 28-37.
24. Tostar S. Mechanical and Thermal Properties of Recycled WEEE Plastic Blends; Chalmers University of Technology: Goteborg, Sweden, 2016.
25. Campbell D., Pethrick R.A., White J.R. Polymer Characterization: Physical Techniques; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2014.
26. Florea D., Paven H., Vuluga Z., Vuluga D.M. Identification, sorting and characterization of plastics from WEEE. *Materiale Plastice*. 2011. 48. P. 176-182.
- References:**
1. Grechaniuk, Ye.V., & Ishchenko, V.A. Study on plastics in electronic waste. In *Kompleksne vykorystannia resursiv dovkillia* [The complex use of environmental resources: abstracts of I All-Ukrainian scientific-practical conference] (pp. 18-20). November 20, 2023, Lutsk, Ukraine [in Ukrainian].
2. Hlavatska, L. Yu. (2021). Analiz systemy povodzhennia z vidkhodamy elektrychnoho ta elektronnoho obladnannia v Ukraini. [Analysis of waste electrical and electronic equipment management in Ukraine]. *Ekologichna bezpeka ta zbalansovane resursokorystuvannia*. №1. 102-108 [in Ukrainian].
3. Grechaniuk, Ye.V., & Ishchenko, V.A. Analysis of polymers in waste electrical and electronic equipment. In *Materialy LIII Naukovo-texnichnoyi konferenciyi VNTU* [Proceedings of LIII scientific-technical conference of VNTU, November 20, 2023, Lutsk, Ukraine. Retrieved from: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2024/paper/view/20469/16979> [in Ukrainian].
4. Vilaplana, F., & Karlsson, S. (2008). Quality concepts for the improved use of recycled polymeric materials: a review. *Macromolecular Materials and Engineering*, 293(4), 274-297.
5. Martinho, G., Pires, A., Saraiva, L., & Ribeiro, R. (2012). Composition of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE) by direct sampling. *Waste Management*, 32(6), 1213-1217.
6. Grigorescu, R. M., Grigore, M. E., Iancu, L., Ghioca, P., & Ion, R. M. (2019). Waste electrical and electronic equipment: A review on the identification methods for polymeric materials. *Recycling*, 4(3), 32.
7. García, M. D. G. T., Schlatter, M., Cabrera, F. M., Manzanares, J. T., & Hanafi, I. (2016). Recycling of acrylonitrile-butadiene-styrene using injection moulding machine. *Procedia Technology*, 22, 399-406.
8. Bai, X., Stein, B. K., Smith, K., & Isaac, D. H. (2012). Effects of reprocessing on additives in ABS plastics, detected by gas chromatography/mass spectrometry. *Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology*, 28(1), 1-14.
9. Thanh Truc, N. T., & Lee, B. K. (2016). Sustainable and selective separation of PVC and ABS from a WEEE plastic mixture using microwave and/or mild-heat treatment with froth flotation. *Environmental science & technology*, 50(19), 10580-10587.
10. Barthes, M. L., Mantaux, O., Pedros, M., Lacoste, E., & Dumon, M. (2012). Recycling of aged ABS from real WEEE through ABS/PC blends in the ABS-rich compositions. *Advances in Polymer Technology*, 31(4), 343-353.
11. Sadat-Shojai, M., & Bakhshandeh, G. R. (2011). Recycling of PVC wastes. *Polymer degradation and stability*, 96(4), 404-415.
12. Poulakis, J. G., & Papaspyrides, C. D. (1997). Recycling of polypropylene by the dissolution/reprecipitation technique: I. A model study. *Resources, conservation and recycling*, 20(1), 31-41.
13. 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.
14. Kayano, Y., Keskkula, H., & Paul, D. R. (1996). Effect of polycarbonate molecular weight and processing conditions on mechanical behaviour of blends with a core-shell impact modifier. *Polymer*, 37(20), 4505-4518.
15. Samavedi, S., Poindexter, L. K., Van Dyke, M., & Goldstein, A. S. (2014). Synthetic biomaterials for regenerative medicine applications. In *Regenerative medicine applications in organ transplantation* (pp. 81-99). Academic Press.
16. Van Krevelen, D.W., & Te Nijenhuis, K. (2009). Properties of Polymers: Their Correlation

with Chemical Structure; their Numerical Estimation and Prediction from Additive Group Contributions. 4th ed. Elsevier.

17. Seymour, R.B., & Carraher, C.E. (2003). *Polymer Chemistry: An Introduction*. 6th ed. Marcel Dekker.

18. Callister, W.D., & Rethwisch, D.G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 10th ed. Wiley.

19. Dimitrakakis, E., Janz, A., Bilitewski, B., & Gidarakos, E. (2009). Small WEEE: determining recyclables and hazardous substances in plastics. *Journal of hazardous materials*, 161(2-3), 913-919.

20. Erickson, M. D., & Kaley, R. G. (2011). Applications of polychlorinated biphenyls. *Environmental Science and Pollution Research*, 18, 135-151.

21. Schlummer, M., Gruber, L., Mäurer, A., Wolz, G., & Van Eldik, R. (2007). Characterisation of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) and implications for

waste management. *Chemosphere*, 67(9), 1866-1876.

22. Buekens, A., & Yang, J. (2014). Recycling of WEEE plastics: A review. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16, 415-434.

23. Maris, E., Botané, P., Wavrer, P., & Froelich, D. (2015). Characterizing plastics originating from WEEE: A case study in France. *Minerals Engineering*, 76, 28-37.

24. Tostar, S. (2016). *Mechanical and Thermal Properties of Recycled WEEE Plastic Blends*; Chalmers University of Technology: Goteborg, Sweden.

25. Campbell, D., Pethrick, R.A., & White, J.R. (2014). *Polymer Characterization: Physical Techniques*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA.

26. Florea, D., Paven, H., Vuluga, Z., & Vuluga, D.M. (2011). Identification, sorting and characterization of plastics from WEEE. *Materiale Plastice*, 48, 176-182.

© Є. В. Гречанюк, В. А. Іщенко, 2025.

Оглядова стаття.

Надійшла до редакції 15.04.25.

Прийнято до публікації 04.06.2025.