

ОЦІНЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОНЕНТІВ ЕЛЕКТРОННОГО ОБЛАДНАННЯ

Анотація. У даному матеріалі розглядаються екологічні ризики, пов'язані з виробництвом полімерних компонентів електронного обладнання, включаючи полімерні носії у схемах (ЕМС), флуорополімери (PFAS) у виробничих процесах та полімерні відходи з електроніки. Представлено методологічний підхід до оцінювання ризиків: аналіз життєвого циклу, поведінка у довкіллі, потенційна токсичність та шляхи регуляції. Висвітлені ключові наукові обґрунтування, зокрема потреба у прозорості хімічного складу, розумінні деградації й нормативному регулюванні [1; 2]. Запропоновано рекомендації для зниження впливу на довкілля та вдосконалення полімерного дизайну для зменшення ризиків. Додатково наголошено на важливості міжнародної гармонізації стандартів і розвитку технологій «зеленої» електроніки, що дозволить мінімізувати накопичення стійких полімерів у відходах. **Ключові слова:** полімери, екологічний ризик, електронне обладнання, PFAS, ЕМС, оцінка ризику.

Abstract. This paper reviews the environmental risks associated with the production of polymer components in electronic equipment, including polymer carriers in circuits (EMC), fluoropolymers (PFAS) in manufacturing processes, and polymer waste from electronics. A methodological approach to risk assessment is presented: life cycle analysis, environmental behavior, potential toxicity, and regulatory pathways. Key scientific rationales are highlighted, including the need for transparency of chemical composition, understanding of degradation, and regulatory regulation [1; 2]. Recommendations are offered for reducing environmental impacts and improving polymer design to reduce risks. Additionally, the importance of international harmonization of standards and the development of "green" electronics technologies is emphasized, which will minimize the accumulation of persistent polymers in waste. **Keywords:** polymers, environmental risk, electronic equipment, PFAS, EMC, risk assessment.

Вступ. Полімерні матеріали є основою багатьох компонентів сучасного електронного обладнання, зокрема в якості корпусів, прошивки (ЕМС), підкладок плат, кабельних ізоляцій та антипіренових покриттів. Їхня технологічна цінність обумовлена міцністю, хімічною стійкістю та низькою собівартістю. Проте саме ці властивості можуть перетворювати полімери на джерело екологічних ризиків у випадках виробництва, використання та утилізації. Особливу небезпеку становлять флуоровмісні полімери (PFAS), які застосовуються у виробництві мікросхем, дисплеїв і батарей. Вони надзвичайно стійкі у довкіллі, що зумовлює їхнє накопичення у ґрунті та воді [3]. Додатковим джерелом ризику є бромовані антипірени (BFRs), які інтегруються у полімери задля забезпечення вогнестійкості. Ці речовини мають токсичні та біоаккумулятивні властивості [1; 4]. Протягом тривалого часу оцінювання екологічних ризиків полімерів здійснювалося поверхово, виходячи з припущення про їхню низьку токсичність через високу молекулярну масу. Сучасні дослідження показують, що процеси старіння полімерів (фотоокислення, термодеструкція) здатні призводити до вивільнення мікро- та наночастинок, а також токсичних добавок [1; 5]. У контексті електронного обладнання ці виклики ускладнюються швидким моральним старінням продукції, високою інтенсивністю виробничих процесів та низьким рівнем утилізації. Тому інтегрований підхід до оцінювання екологічних ризиків, що враховує увесь життєвий цикл полімерів (LCA), стає необхідним [6].

Результати дослідження

Прозорість хімічного складу та кластеризація полімерів. Одним з головних бар'єрів у прогнозуванні екологічних ризиків полімерів є недостатня доступність інформації щодо їхнього складу. Часто комерційні рецептури містять суміші полімерних матриць, пластифікаторів, стабілізаторів та антипіренів, що ускладнює оцінювання їхньої безпеки. За результатами досліджень [1], ідентифікація хімічного складу є передумовою для класифікації полімерів і визначення їхньої поведінки у довкіллі. Регламенти на кшталт REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals - система ЄС для контролю хімічних речовин) уже роблять кроки в цьому напрямку, однак вони потребують подальшого вдосконалення.

Флуорополімери (PFAS) у виробництві електроніки. PFAS активно використовуються у виробництві мікросхем, рідкокристалічних дисплеїв та літій-іонних батарей. Вони забезпечують високу термо- та хімічну стійкість матеріалів. Проте дослідження [3] доводять, що PFAS є «вічними хімікатами», стійкими до природної деградації, і можуть призводити до забруднення ґрунтових та поверхневих вод. Їхня наявність у виробництві електроніки створює подвійний ризик: по-перше, на стадії технологічних процесів; по-друге, під час утилізації електронних відходів [4].

Деградація, фільтрат та утворення мікро- і наночастинок. Полімерні матеріали під дією ультрафіолетового випромінювання та кисню зазнають процесу фотоокислення, що призводить до утворення низькомолекулярних продуктів та мікропластикових частинок [5]. Ці частинки здатні мігрувати у водні системи, де вони взаємодіють з токсикантами, підсилюючи їхнє біологічне надходження. Окрім того, у процесі деградації можливе вивільнення стабілізаторів та пластифікаторів, які становлять додатковий ризик для біоти. У сучасних дослідженнях усе більше уваги приділяється не лише токсичності окремих сполук, а й їхнім синергічним ефектам. Наприклад, комбінація мікропластикових частинок із важкими металами чи органічними забруднювачами може значно підсилювати негативний біологічний ефект [2]. Це ставить завдання для майбутніх досліджень - розробити методологію оцінки комбінованих ризиків, що є особливо актуальним у сфері електронних відходів.

Додатки як джерело токсичності - BFRs. Бромовані антипірени, широко застосовувані у полімерних компонентах побутової електроніки, належать до групи речовин, що є стійкими органічними забруднювачами. Вони здатні до біоаккумуляції у трофічних ланцюгах та проявляють токсичну дію [4]. Особливої загрози вони набувають у країнах із недостатньо розвинутою системою переробки WEEE, де BFRs вивільняються у ґрунт і атмосферу під час неконтрольованого спалювання чи механічного дроблення відходів.

Обмеження поточного LCA-підходу. Життєвий цикл електроніки, особливо виробництво напівпровідникових чипів, пов'язаний із високими витратами енергії, води та ресурсів [6]. Проте традиційні підходи LCA не завжди враховують довготривалі екологічні наслідки полімерних матеріалів. Інтеграція ризиків, пов'язаних із PFAS, BFRs та мікропластиком, зробить оцінювання більш комплексним та релевантним. Перспективним напрямом є застосування полімерів з контрольованою деградацією, які здатні розкладатися до нетоксичних продуктів після завершення експлуатаційного циклу. Такі матеріали поки що перебувають на стадії лабораторних випробувань, однак у майбутньому вони можуть змінити підходи до управління відходами електроніки.

Висновки

Оцінювання екологічних ризиків, пов'язаних із виробництвом полімерних компонентів електронного обладнання, засвідчує необхідність підвищення прозорості у визначенні їхнього хімічного складу та класифікації. Це дає змогу більш цілеспрямовано аналізувати поведінку полімерів у довкіллі й прогнозувати потенційні загрози. Найбільші ризики пов'язані з використанням флуорованих полімерів (PFAS) та бромованих антипіренів (BFRs), які відзначаються високою стійкістю й токсичністю та створюють додаткове навантаження на екосистеми як під час виробництва, так і утилізації відходів. Додатковим фактором небезпеки є деградація полімерів із утворенням мікро- та наночастинок і вивільненням шкідливих добавок, що підсилює довготривалий вплив на біоту й водні екосистеми. Сучасний підхід до аналізу життєвого циклу електронного обладнання потребує інтеграції ризиків, пов'язаних із полімерними матеріалами, для комплексної оцінки їхнього впливу. Для зниження негативних наслідків необхідно впроваджувати маркування полімерних компонентів, замінювати небезпечні добавки безпечними аналогами, розвивати інноваційні технології переробки та створювати нове покоління полімерів, здатних до біорозкладу або повторного використання. Важливим завданням є також формування системи міжнародного моніторингу полімерних токсикантів у ланцюгах виробництва й переробки електроніки. Спільні бази даних щодо токсичності та екологічної поведінки полімерів сприятимуть ефективнішому регулюванню, а розвиток циркулярної економіки в електроніці має ґрунтуватися на поєднанні регуляторних, технологічних і наукових рішень, що дозволить знизити екологічне навантаження від полімерних матеріалів.

Список використаної літератури

1. Groh, K. J., Arp, H. P. H., MacLeod, M., & Wang, Z. (2023). Assessing and managing environmental hazards of polymers: Historical development, science advances and policy options. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 25(1), 10–25. <https://doi.org/10.1039/D2EM00386D>
2. Manayath, D., Travas-Sejdic, J., Leitao, E. M., & Kah, M. (2025). Environmental and human risk assessment of polymer nanocarriers: A review on current analytical challenges and promising approaches. *Environmental Science: Nano*, 12(5), 1079–1106. <https://doi.org/10.1039/D4EN01033G>
3. Elgamal, M., Mahmoud, A., Wei, G.-Y., Brooks, D., & Hills, G. (2025). Modeling PFAS in semiconductor manufacturing to quantify trade-offs in energy efficiency and environmental impact of computing systems. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2505.06727>
4. Ecotoxicity of plastics from informal waste electric and electronic treatment and recycling. (2025). *Toxics*, 8(4), 99. MDPI. <https://doi.org/10.3390/toxics8040099>
5. Photo-oxidation of polymers. (2025). *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Photo-oxidation_of_polymers
6. Deng, L., Li, Y., Li, X., & Liu, Z. (2022). Assessing environmental impacts of nanoscale semiconductor manufacturing from the life cycle assessment perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 182, 106289. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106289>