

УДК 621.383.51:628.4.042:620.193

ON THE NECESSITY OF DISPOSAL AND REUSE OF LED LIGHT SOURCE MATERIALS AFTER THEIR END OF USE

ПРО НЕОБХІДНІСТЬ УТИЛІЗАЦІЇ ТА ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ МАТЕРІАЛІВ СВІТЛОДІОДНИХ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА ПІСЛЯ ЗАВЕРШЕННЯ ТЕРМІНУ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ

Basova Y. / Басова Ю.О.,*c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0003-4057-7712

*Poltava State Agrarian University, Poltava,**Полтавський державний аграрний університет, Полтава***Baghirov S. / Багіров С.А.,**

ORCID: 0000-0001-9411-1374

*c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.**Azerbaijan Technical University, Baku,**Азербайджанський технічний університет, Баку***Kyslytsia S. / Кислиця С.Г.,***c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0002-2431-9900

*National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava,**Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава***Guba L. / Губа Л.М.***c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0003-1008-6023

*National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine,**Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава*

Анотація. У роботі розглянуто проблеми утилізації та повторного використання матеріалів світлодіодних джерел світла після завершення їх терміну служби. Акцент зроблено на важливості переходу до циркулярної економіки та екодизайну як засобів сталого розвитку. Проаналізовано склад світлодіодних ламп, зокрема вміст рідкоземельних елементів та дорогоцінних металів, і визначено їх цінність для вторинного використання. Обґрунтовано необхідність розробки ефективних технологій переробки світлодіодних джерел світла для зменшення екологічного навантаження. Робота підкреслює актуальність теми для екологічної безпеки та ресурсної незалежності України.

Ключові слова: світлодіодні джерела світла, циркулярна економіка, рідкоземельні елементи, утилізація електронних відходів

Abstract. The paper considers the problems of recycling and reuse of materials of LED light sources after the end of their service life. The emphasis is on the importance of the transition to a circular economy and eco-design as means of sustainable development. The composition of LED lamps, in particular the content of rare earth elements and precious metals, is analyzed, and their value for secondary use is determined. The need to develop effective technologies for recycling LED light sources to reduce the environmental load is substantiated. The paper emphasizes the relevance of the topic for environmental safety and resource independence of Ukraine.

Key words: LED light sources, circular economy, rare earth elements, electronic waste disposal

Вступ.

Проблеми ефективного використання ресурсів планети потребують термінового переходу до сталого споживання та виробництва. Сталий розвиток (sustainable development) – це загальна концепція щодо необхідності встановлення балансу між задоволенням сучасних потреб людства і захистом інтересів майбутніх поколінь, включаючи їх потребу в безпечному і здоровому довкіллі.

Сучасний рівень використання природних ресурсів свідчить, що існуючі технології виробництва, споживання ресурсів і управління відходами вже не є ефективними та завдають значної шкоди навколишньому середовищу в глобальному масштабі. Вирішення цих проблем потребує зміни вектору розвитку сучасного суспільства, зокрема, перехід із застарілої моделі “лінійної економіки” до моделі “циркулярної економіки”, яка орієнтована на сталий розвиток.

Перевагами нової моделі є мінімізація відходів, повторне використання ресурсів, зменшення шкідливого впливу на довкілля та підвищення ефективності виробництва [1]. Концепція циркулярної економіки сьогодні прийнята в більшості економічно розвинених країн. Рациональне використання ресурсів є наріжним каменем Плану дій ЄС щодо впровадження циркулярної економіки. Зниження впливу на навколишнє середовище і скорочення кінцевих відходів визначені як основні цілі, що стосуються матеріальної ефективності продукції.

Основний текст.

Підвищення ефективності використання матеріальних ресурсів передбачається різними заходами, в тому числі, і встановленням вимог Директивами ЄС з екодизайну стосовно можливості повторного використання/виробництва/переробки відходів. В Плані дії ЄС по циркулярній економіці екодизайн визначено як один із основних принципів розвитку циркулярної економіки в ЄС. Повторне використання матеріалів вважається ключовим фактором для циркулярної економіки, що дозволяє скоротити споживання ресурсів і запобігти утворенню нових потоків відходів [2]. Новий

регламент ЄС 2024/1781 [1] розширює рамки вимог до екодизайну з метою покращення екологічної стійкості продуктів. Вимоги направлені на покращення наступних аспектів продукції: довговічності, надійності, ремонтпридатності, можливості обслуговування, енергоефективності, ефективності використання ресурсів, можливості переробки, можливості відновлення матеріалів, зменшення утворення підходів та інше.

Джерела світла світлодіодних ламп та світильників складаються з одного або кількох напівпровідникових світлодіодних кристалів, які зібрані в одну або багачіпову матрицю (світлодіодний модуль). Ці модулі інтегруються в лампу або світильники під'єднуються до електронного блоку живлення (драйвера) та радіатора. Для загального освітлення зазвичай використовується кілька класів світлодіодів:

- світлодіоди малої потужності з SMD корпусом (для поверхневого монтажу);
- корпусні потужні світлодіоди зі світловим потоком 70-120 лм;
- багаточіпові масиви (COB-модулі) зі світловими потоками понад 6000 лм.

Основні матеріали і їхня маса в різних конструкціях світлодіодних ламп та світильників подані в багатьох наукових дослідженнях, зокрема у таких роботах [3]. Ключовими матеріалами для виробництва світлодіодів та світлодіодних світильників є рідкоземельні елементи (РЗЕ) [3]. Вони використовуються в невеликій кількості для виготовлення світловипромінюючих кристалів та люмінофорів. Водночас варто зазначити, що світові запаси цих елементів є обмеженими, тоді як глобальний попит на них постійно зростає. Це може призвести до ускладнення доступу до цих ресурсів в майбутньому. Крім того, добування первинної сировини і виробництво РЗЕ високої частоти супроводжується значним негативним впливом на навколишнє середовище.

Найбільш поширеним інструментом для визначення екологічного профіля продукту є оцінка життєвого циклу (LCA). З використанням LCA можна оцінити потенційний вплив продукту на навколишнє середовище протягом життєвого циклу – від добування сировини до утилізації після завершення строку служби.

За останні два десятиліття було проведено велику кількість LCA для різних продуктів, зокрема й для світлодіодних джерел світла [3-5]. Показано, що світлодіодні лампи та світильники після закінчення строку служби утворюють відходи, що в порівнянні з етапами життєвого циклу «виробництва» та «використання» мають значно менший загальний вплив на навколишнє середовище. Водночас вони можуть створювати певні категорії екологічної загрози (наприклад, вплив небезпечних відходів).

Світлодіодні джерела світла після закінчення строку служби є новим типом електронних відходів [6] і містять як цінні, так і небезпечні матеріали. Незважаючи на незначну масу одного світлодіода, загальна кількість світлодіодів, що використовуються в лампах та світильниках є незвичайно великою. Це зумовлює потребу в ефективному управлінні та переробці як з погляду повторного використання ресурсів, так і з метою запобігання негативного впливу на довкілля.

Сьогодні світлодіодні джерела світла є найбільш перспективними і їх виробництво щорічно збільшується приблизно на 4%. Очікується, що в 2030 році частка світлодіодного освітлення може перевищити 95% від загальної кількості джерел для освітлення [7]. Це призведе до утворення великої кількості відходів, які містять, крім таких металів як мідь, нікель, свинець, алюміній та інших металів традиційних для відходів електричного та електронного обладнання і специфічні елементи і матеріали – РЗЕ і дорогоцінні метали (ДМ), які можна класифікувати як критичні, оскільки їх концентрація у відходах вище, ніж у земній кулі [8].

Охорона навколишнього середовища пов'язані споживанням енергоресурсів, охороною природних запасів сировини, попередження забруднення повітря, водних та земельних ресурсів відходами електронного та електронного обладнання (WEEE). Циркулярна економіка та переробка відходів відповідно з директивою ЄС 2012/19 EU [9] може впливати на охорону навколишнього середовища двома способами:

- 1) завдяки зменшенню споживання енергоресурсів та води, що

використовуються на етапах від природного видобутку копалин до виробництва сировини (споживання енергоресурсів на відновлення матеріалів з відходів може бути зменшене до 80% в порівнянні з видобутком їх з копалин);

2) завдяки зменшенню викидів та захороненню відходів, оскільки циркулярна економіка спрямована на мінімізацію відходів та скороченню видобутку корисних копалин.

Особливо цінними для переробки є світлодіоди для поверхневого монтажу (SMD), які містять у своїй структурі РЗЕ та ДМ. Світлодіодні джерела світла є новими видами електронних відходів, для яких наразі не існує стандартизованих процесів переробки. Переробку світлодіодних джерел світла доцільно проводити в кілька етапів. На першому етапі можна провести розділення конструкції на метали, пластмаси, кераміку, драйвери, світлодіоди та світлодіодні модулі. На другому етапі драйвери можна розділити на електронні компоненти та оголені друковані плати, а світлодіодні модулі – на SMD-світлодіоди та оголений світлодіодний модуль. Для зменшення втрат та підвищення рівня відновлення цінної та важливої сировини може застосовуватись вибіркове видалення компонентів. Це допоможе досягти найкращого можливого балансу між економічною вигідною та впливом процесів переробки на навколишнє середовище.

Концентрація РЗЕ та ДМ в світлодіодних джерелах світла суттєво змінюється залежно від потужності та кольорних параметрів, а також від виду світлодіодів світлодіодних матриць. У [8] узагальнені результати дослідження різних типів комерційних зразків світлодіодних ламп на рівень концентрації РЗЕ та ДМ в їх відходах. Дослідження були проведені на 221 світлодіодній лампі різних конструкцій з використанням SMD-світлодіодів, виготовлених в період 2016-2021 роках. Встановлено, що для всіх ламп з корельованою кольоровою температурою CCT від 2700 К до 6500 К спостерігається наявність таких РЗЕ (з рідної концентрацією мг/кг відходів): La, Ce, Eu, Gd, Tb, Y.

Зокрема, лантан (La) виявлений у світлодіодах з ССК 2700-3000 К з концентраціями між 242 мг/кг і 1840 мг/кг, що є значно вищими за концентрацію

в земній корі (39 мг/кг). Концентрація церія (Ce) змінюється від 132 мг/кг до 289 мг/кг, що є також вищою за концентрацією в земній корі (66,5 мг/кг). Це стосується як ламп з низькою так із високою CCT. Концентрацією європій (Eu) в досліджуваних SMD-світлодіодах також була вищою (між 197 мг і 320 мг/кг), ніж концентрація в земній корі (2 мг/кг).

Концентрація ітрій (Y) у досліджуваних SMD-світлодіодів коливалась від 4804 мг/кг до 11551 мг/кг. Це найвища концентрація серед всіх виявлених РЗЕ і є значною вищою ніж в земній корі (33 мг/кг). Концентрація гадоліній (Gd) у цьому дослідженні (6-13 мг/кг) є співрозмірна з концентрацією в земній кулі (6,2 мг/кг), а тербій (Tb) – (0,1-0,4 мг/кг) нижчою, ніж у земній корі (1,2 мг/кг). Відзначається, що елементи Y, Gd, La та Ce містяться в люмінофорах, що використовуються в світлодіодах для коригування колірності.

Присутність у відходах світлодіодних ламп ДМ пов'язана з зовнішніми електричними контактами, залишками припою, електричними з'єднаннями зовнішніх електричних контактів SMD-світлодіодів та інше. Концентрація срібла (Au) у цьому дослідженні коливалась між 2712 мг до 5262 мг/кг (концентрація в земній корі 0,075 мг/кг), а концентрація золота (Ag) – 150-3687 мг/кг (концентрація в земній корі 0,0032 мг/кг).

Таблиця 1 – Концентрацію РЗЕ та ДМ у SMD-світлодіодах та їх поширення у земній корі

Елемент	Назва	Концентрація в LED (мг/кг)	Вміст у земній корі (мг/кг)
La	Лантан	242–1840	39
Ce	Церій	132–289	66,5
Eu	Європій	197–320	2
Y	Ітрій	4804–11551	33
Gd	Гадоліній	6–13	6,2
Tb	Тербій	0,1–0,4	1,2
Au	Срібло	2712-5262	0,075
Ag	Золото	150 - 3687	0,0032

[авторська розробка]

Висновки.

Наведені результати вказують на доцільність видалення SMD-світлодіодів із світлодіодних ламп після завершення строку служби і їх переробки з метою отримання цінної для промисловості сировини – РЗЕ та ДМ.

Ця проблема актуальна ще й тому, що в Україні в майбутньому планується добування сировини і впровадження технології виробництва рідкоземельних елементів. Не менш важливим аспектом утилізації світлодіодних ламп є запобігання забруднення навколишнього середовища небезпечними речовинами (наприклад, свинець та миш'як), які містяться у невеликій кількості у відходах.

Завдяки реалізації вимог Регламентів з екодизайну за останні тисячоріччя отримано суттєве підвищення енергоефективності та екологічності світлодіодних ламп [10]. Таким чином, сьогодні політика екодизайну є важливим механізмом підвищення не тільки енергоефективності та економічності, але і ефективного використання матеріальних ресурсів.

Література

1. Regulation (EU) 2024/1781 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products, amending Directive (EU) 2020/1828 and Regulation (EU) 2023/1542 and repealing Directive 2009/125/EC <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj/eng>
2. Foster, G., 2020. Circular economy strategies for adaptive reuse of cultural heritage buildings to reduce environmental impacts. *Resour. Conserv. Recy.* 152, 104507. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104507> (Accessed 15 January 2025).
3. Manuela Franz, Franz Peter Wenzl. Critical Review on Life Cycle Inventories and Environmental Assessments of LED-Lamps. *Critical Reviews In Environmental Science and Technology.* September 2017. 47(5). DOI:[10.1080/10643389.2017.1370989](https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1370989)
4. Jose Adolfo Lozano, Hermoso-Orzáez Manuel Jesús, Alfonso Gago-Calderon, Paulo Brito. LCA Case Study to LED Outdoor Luminaries as a Circular Economy

Solution to Local Scale

5. Leena Tähkämö, Manuel Bazzana, Pierre Ravel, Francis Grannec. Life cycle assessment of light-emitting diode downlight luminaire - A case study. The International Journal of Life Cycle Assessment. June 2013 . 18(5) DOI: [10.1007/s11367-012-0542-4](https://doi.org/10.1007/s11367-012-0542-4)

6. Sheng Fang, Wenyi Yan, Hongbin Cao, Qingbin Song, Yi Zhang, Zhi Sun/ Evaluation on end-of-life LEDs by understanding the criticality and recyclability for metals recycling. Journal of Cleaner Production. Volume 182, 1 May 2018, Pages 624-633. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.260>

7. SM Mizanur Rahman, Stéphane Pompidou, Thècle Alix, Bertrand Laratte A review of LED lamp recycling process from the 10 R strategy perspective/ Sustainable Production and Consumption. Vol. 28, October 2021, P. 1178-1191 <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.07.025> (Accessed 15 January 2025).

8. Konstantinos M. Sideris, Ioannis Katsiris, Dimitrios Fragkoulis, Vassilis N. Stathopoulos, Panagiotis Sinioros. Waste SMD LEDs from End-of-Life Residential LED Lamps: Presence and Characterisation of Rare Earth Elements and Precious Metals as a Function of Correlated Colour Temperature. *Recycling* 2024, 9(6), 128; <https://doi.org/10.3390/recycling9060128>

9. Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) (recast) Text with EEA relevance <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/19/oj/eng>

10. Шпак С, Багіров С. А. огли, Пітяков О, Кислиця С, Сахно Т, Кожушко Г. Застосування політики екодизайну та енергетичного маркування для підвищення енергоефективності та якості світлодіодних джерел світла. Український метрологічний журна. 2024 №2, 39-50