

96. Лавріщев О.О., Житомирський агротехнічний фаховий коледж.

**ПРОБЛЕМАТИКА УТИЛІЗАЦІЇ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ, ЯКІ ВІДПРАЦЮВАЛИ СВІЙ
ТЕРМІН ПРИДАТНОСТІ**

Зростаюче використання сонячної енергетики в світі призводить до накопичення значної кількості відпрацьованих фотоелектричних модулів. За даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики (IRENA), глобальний обсяг відходів сонячних панелей може досягти 78 мільйонів тонн до 2050 року [1]. Типовий термін служби сонячних панелей становить 25-30 років, після чого їх ефективність знижується, що зумовлює необхідність заміни та, відповідно, утилізації. Неналежна переробка таких відходів створює екологічні ризики через наявність у їхньому складі потенційно небезпечних компонентів. Тому розробка та вдосконалення технологій утилізації фотоелектричних модулів є актуальним науково-технічним завданням.

На сучасному ринку представлені три основні типи фотоелектричних модулів:

1. Кристалічні кремнієві (с-Si) – складають приблизно 90% світового ринку [2];
2. Тонкоплівкові модулі:
 - Телурид кадмію (CdTe);
 - Селенід міді-індію-галію (CIGS);
 - Аморфний кремній (а-Si).

Типова структура кристалічної кремнієвої панелі включає наступні компоненти (за масою) [3]:

- Скло (70-75%)
- Алюмінієва рама (10-15%)
- Інкапсулянт (етилен-вінілацетат, EVA) (6-8%)
- Кремнієві фотоелектричні елементи (3-5%)
- Тильний захисний шар (Tedlar/PVF) (2-3%)

- Розподільна коробка, кабелі, конектори (1-2%)
- Шини та контакти із міді, срібла, олова (< 1%)

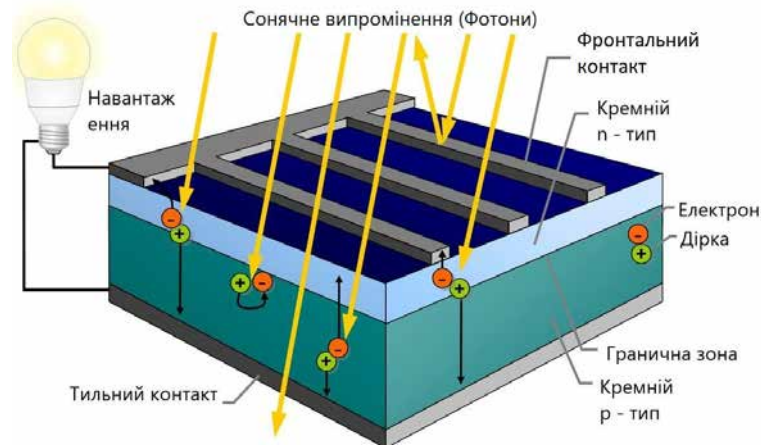


Рис. 1. Структура типової кристалічної кремнієвої фотоелектричної панелі

Відпрацьовані сонячні панелі містять ряд потенційно небезпечних матеріалів, що потребують спеціальних умов утилізації [4]:

1. У кристалічних кремнієвих модулях:
 - Свинець (Pb) у припоях (0,1-0,5% маси панелі)
 - Срібло (Ag) у металізаційних пастах
 - Антипірени на основі галогенів у кабелях та розподільних коробках
2. У тонкоплівкових модулях:
 - Кадмій (Cd) в CdTe-панелях (~ 0,1% маси)
 - Селен (Se) в CIGS-панелях
 - Індій (In) та галій (Ga) в CIGS-панелях

Згідно з дослідженнями, проведеними Weckend та ін. [5], неналежна утилізація сонячних панелей може призвести до вилугування небезпечних речовин у ґрунт та ґрунтові води. Наприклад, експериментально встановлено, що концентрація свинцю у вилугуваній рідині може перевищувати гранично допустимі рівні у 10-50 разів.

Сучасні методи переробки фотоелектричних модулів включають наступні підходи [6]:

1. **Механічна обробка:** включає послідовне розбирання, подрібнення і сепарацію матеріалів за фізичними властивостями (щільність, магнітність, розмір).
2. **Термічна обробка:** піроліз органічних компонентів (EVA, тильний шар) з подальшою переробкою залишків.
3. **Хімічна обробка:** використання розчинників для відділення компонентів, вилугування цінних металів кислотами.

Найбільш ефективним вважається комбінований підхід, що включає такі етапи [7]:

1. Видалення алюмінієвої рами та розподільної коробки (ручне або автоматизоване)
2. Термічна обробка для видалення ламінуючих матеріалів (~500°C)
3. Подрібнення скла та відділення металевих компонентів
4. Хімічна обробка для вилучення цінних металів

Ефективність існуючих процесів переробки за матеріалами [8]:

- Алюміній: > 95%
- Скло: > 90%
- Напівпровідники та метали: 40-80%

На світовому ринку представлено кілька спеціалізованих компаній, що займаються утилізацією фотоелектричних модулів:

1. PV Cycle (Європейський Союз) – некомерційна асоціація, що забезпечує колективну систему утилізації. За даними їх звітів, компанія досягла рівня переробки більше 96% для кристалічних кремнієвих модулів [9].
2. Veolia (Франція) – у співпраці з PV Cycle розробила перший у Європі завод повного циклу переробки сонячних панелей у м. Руссе, потужністю до 4000 тонн на рік [10].
3. First Solar (США) – має власну патентовану технологію рециклінгу CdTe-модулів, що дозволяє відновити до 95% напівпровідникових матеріалів та 90% скла [11].

4. Recycle PV Solar (США) – спеціалізується на переробці різних типів сонячних панелей, встановила партнерські відносини з виробниками та розробниками сонячних електростанцій [12].

5. ROSI Solar (Франція) – розробила інноваційну технологію вилучення срібла та кремнію високої чистоти з відпрацьованих фотоелектричних модулів [13].

Порівняння ефективності технологій різних компаній наведено у Таблиці 1.

Таблиця 1. Порівняння технологій переробки провідних компаній

Компанія	Тип панелей	Метод переробки	Рівень відновлення матеріалів	Вартість переробки
PV Cycle	Si, CdTe, CIGS	Механічний + термічний	85-96%	250-300 €/т
First Solar	CdTe	Хімічний + механічний	90-95%	Включено у вартість панелей
Veolia	Si	Механічний + термічний	95%	250-400 €/т
ROSI Solar	Si	Хімічний + механічний	98% (для металів)	300-450 €/т

За прогнозами IRENA, ринок переробки сонячних панелей до 2050 року може генерувати матеріальні активи на суму близько 15 мільярдів доларів США [14]. Рециклінг однієї тонни кремнієвих фотоелектричних модулів дозволяє отримати:

- До 686 кг скла
- 70 кг алюмінію
- 10 кг міді
- 7-8 кг срібла
- 30-40 кг кремнію

Відновлення цих матеріалів зменшує потребу у видобутку первинної сировини та енергетичні витрати на її обробку. За оцінками Latunussa та ін. [15], повний цикл переробки дозволяє скоротити викиди парникових газів на 800-1200 кг CO₂-еквівалента на тонну панелей порівняно з виробництвом з первинної сировини.

Перспективними напрямками вдосконалення технологій утилізації є:

1. **Розробка методів автоматизованого неруйнівного демонтажу** - дозволить зберегти цілісність скла та інших компонентів, підвищивши їх вартість при вторинному використанні [16].

2. **Удосконалення методів вилучення рідкісних і дорогоцінних металів** - нові технології селективного розчинення та електрохімічного осадження здатні підвищити ефективність відновлення срібла, індію, галію до 95-98% [17].

3. **Розробка процесів очищення кремнію до сонячної якості** - кремній із відпрацьованих панелей потенційно може використовуватись для виробництва нових фотоелементів, зменшуючи енергоємність та вартість [18].

4. **Створення замкнутих циклів виробництва** - розробка модульних конструкцій панелей, оптимізованих для легкого розбирання та переробки [19].

Успішний розвиток галузі утилізації сонячних панелей суттєво залежить від регуляторного середовища. Ключові аспекти включають:

1. **Розширення відповідальності виробника (EPR)** - У ЄС директива WEEE з 2012 року включає фотоелектричні панелі, зобов'язуючи виробників фінансувати збір та утилізацію відпрацьованих модулів [20].

2. **Стандартизація процедур утилізації** - Розробка єдиних протоколів та стандартів як для процесів переробки, так і для вимірювання їх ефективності.

3. **Податкові стимули та субсидії** - Державна підтримка для компаній, що інвестують у розвиток технологій рециклінгу сонячних панелей.

4. **Сертифікація** - Впровадження екомаркування та сертифікатів для панелей з покращеними характеристиками щодо можливості переробки.

Висновки. Аналіз сучасного стану проблеми утилізації відпрацьованих сонячних панелей дозволяє зробити наступні висновки:

1. Зростаючі обсяги відходів фотоелектричних модулів створюють значні екологічні ризики через наявність потенційно небезпечних компонентів, таких як свинець, кадмій та інші важкі метали.
 2. Існуючі технології переробки дозволяють успішно відновлювати більшість матеріалів (скло, алюміній, частково метали та напівпровідники), проте залишаються економічно недостатньо ефективними через високу вартість процесів.
 3. Провідні компанії галузі успішно реалізують комбіновані підходи до переробки, досягаючи рівня утилізації 85-96%, але потужності переробки значно відстають від прогнозованих обсягів відходів.
 4. Перспективи розвитку галузі пов'язані з:
 - Удосконаленням технологій вилучення цінних матеріалів
 - Розробкою нових конструкцій панелей, оптимізованих для переробки
 - Розвитком регуляторного середовища та впровадженням принципів циркулярної економіки
 - Інтеграцією утилізації в ланцюжок створення вартості сонячної енергетики
- Реалізація комплексного підходу до проблеми утилізації фотоелектричних модулів є необхідною умовою забезпечення екологічної сталості сонячної енергетики, яка наразі демонструє найвищі темпи зростання серед усіх джерел енергії.

Список використаних джерел

1. IRENA and IEA-PVPS (2016), End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels, International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems.
2. Fraunhofer ISE (2024), Photovoltaics Report, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems.
3. Xu, Y., Li, J., Tan, Q., Peters, A. L., & Yang, C. (2018). Global status of recycling waste solar panels: A review. *Waste Management*, 75, 450-458.
4. Tammaro, M., Salluzzo, A., Rimauro, J., Schiavo, S., & Manzo, S. (2016). Experimental investigation to evaluate the potential environmental hazards of photovoltaic panels. *Journal of Hazardous Materials*, 306, 395-405.
5. Weckend, S., Wade, A., & Heath, G. (2016). End of Life Management: Solar Photovoltaic Panels. IRENA and IEA-PVPS.
6. Chowdhury, M.S., Rahman, K.S., Chowdhury, T., Nuthammachot, N., Techato, K., Akhtaruzzaman, M., Tiong, S.K., Sopian, K., & Amin, N. (2020). An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews*, 27, 100431.
7. Huang, B., Zhao, J., Chai, J., Xue, B., Zhao, F., & Wang, X. (2017). Environmental influence assessment of China's multi-crystalline silicon (multi-Si) photovoltaic modules considering recycling process. *Solar Energy*, 143, 132-141.
8. DAdamo, I., Miliacca, M., & Rosa, P. (2023). Economic Feasibility for Recycling of Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules. *International Journal of Photoenergy*, 2023, 1-11.
9. PV Cycle (2023), Annual Report 2022, PV Cycle Association.
10. Veolia (2023), PV Panel Recycling Technology, Veolia Environmental Services.
11. First Solar (2023), Sustainability Report, First Solar Inc.
12. Recycle PV Solar (2022), Technology and Services Overview, Recycle PV Solar LLC.
13. ROSI Solar (2023), High-value PV recycling technologies, ROSI Solar.
14. IRENA (2021), Future of Solar PV: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects, International Renewable Energy Agency.
15. Latunussa, C.E.L., Ardenete, F., Blengini, G.A., & Mancini, L. (2016). Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 156, 101-111.
16. Kim, J., & Park, J. (2023). Perspectives on alternative photovoltaic module designs to enhance recoverability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165, 112612.
17. Huang, W.-H., Shin, W.J., Wang, L., Sun, W.-C., & Tao, M. (2017). Strategy and technology to recycle wafer-silicon solar modules. *Solar Energy*, 144, 22-31.
18. Jung, B., Park, J., Seo, D., & Park, N. (2016). Sustainable System for Raw-Metal Recovery from Crystalline Silicon Solar Panels: From Noble-Metal Extraction to Lead Removal. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(8), 4079-4083.
19. Suez, E., & Dulac, N. (2023). Eco-design of PV modules for improved recyclability. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 241, 111950.

20. European Parliament and Council (2012), Directive 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (WEEE). Official Journal of the European Union, L 197, 38-71.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЖИТОМИРСЬКИЙ АГРОТЕХНІЧНИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ



ЗБІРНИК ТЕЗ

XI Міжнародної науково-практичної конференції
**«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій
та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»**

<https://doi.org/10.64165/proceeding-ptdstsamt.2025>



11 квітня 2025 року
м. Житомир

<https://doi.org/10.64165/proceeding-ptdstsamt.2025>

УДК 631.2:621.017:615.281:340(477)

Збірник тез доповідей XI Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь. PTDSTSAMT-2025» з нагоди 30-річчя започаткування підготовки ОС «Бакалавр» за спеціальністю «Агроінженерія». 11 квітня 2025 року. МОН України. Житомирський агротехнічний фаховий коледж. Житомир. 2025. 333 с. <https://doi.org/10.64165/proceeding-ptdstsamt.2025>.

Рекомендовано до друку методичною радою Житомирського агротехнічного фахового коледжу МОН України (протокол від 10.04.2025 р. № 6)

Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference "Prospects and Trends in Development of Structures and Technical Service of Agricultural Machinery and Tools. PTDSTSAMT-2025." on occasion of the 30th anniversary of the initiation of the preparation of the Bachelor's Entity in the specialty "AgroEngineering". April 11, 2025. Ministry of Education and Science of Ukraine. Zhytomyr Agrotechnical Professional College. Zhytomyr. 2025. 333 p. <https://doi.org/10.64165/proceeding-ptdstsamt.2025>.

В збірнику представлені тези доповідей науково-педагогічних працівників, наукових співробітників, аспірантів та студентів Житомирського агротехнічного фахового коледжу, провідних вітчизняних і закордонних закладів вищої освіти та наукових установ, в яких розглядаються завершені етапи розробок.

The collection presents abstracts of reports by scientific and pedagogical workers, researchers, postgraduates and students of the Zhytomyr Agrotechnical Professional College, leading domestic and foreign higher educational institutions and scientific institutions, which consider the completed stages of development.

Передрук або інше відтворення в будь-якій формі в цілому або частково матеріалів, опублікованих у цьому віданні, дозволено лише за посиланням на джерело і дотриманням вимог законодавства