УДК 678.08; JEL classification Q53, O33, Q57 **DOI: https://doi.org/10.36887/2415-8453-2025-4-30**

Поліщук Андрій Олегович[1], доктор філософії, доцент кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Поліщук Олег Степанович[1], декан факультету інженерії, транспорту та архітектури

Скиба Микола Єгорович[1], професор кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Поліщук Олег[1], аспірант

[1]*Хмельницький національний університет*

Polishchuk Andrii[1], Doctor of Philosophy (PhD), Associate Professor of the Department of Machines and Devices, Electromechanical and Energy Systems, https://orcid.org/0000-0001-7887-7169

Polishchuk Oleh[1], Dean of the Faculty of Engineering, Transport and Architecture, https://orcid.org/0000-0002-9764-8561

Skyba Mykola[1], Professor of the Department of Machines and Apparatuses, Electromechanical and Energy Systems, https://orcid.org/0000-0003-0217-9633

Polishchuk Oleh[1], Postgraduate student, https://orcid.org/0009-0005-0897-6272

[1]*Khmelnytskyi National University*

ПОДРІБНЮВАЧ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ: КОНСТРУКЦІЯ, ПРИНЦИП ДІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ
CRUSHER OF POLYMER MATERIALS: DESIGN, PRINCIPLE OF OPERATION, AND PROSPECTS OF APPLICATION

Поліщук А. О., Поліщук О. С., Скиба М. Є., Поліщук О. Подрібнювач полімерних матеріалів: конструкція, принцип дії та перспективи застосування. *Український журнал прикладної економіки та техніки*. 2025. Том 10. № 4. С. 160 – 163.

Polishchuk A., Polishchuk O., Skyba M., Polishchuk O. Crusher of polymer materials: design, principle of operation, and prospects of application. *Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology*. 2025. Volume 10. № 4, pp. 160 – 163.

У статті розглядається актуальна проблема накопичення полімерних відходів, що утворюються внаслідок інтенсивного розвитку технологій адитивного виробництва (зокрема FDM-друку), а також у процесах легкої промисловості, таких як швейне, взуттєве та шкіргалантерейне виробництво. Доведено, що ці відходи складаються з технічно цінних полімерних матеріалів, зокрема ABS, PLA, PETG, EVA та інших, які можуть бути ефективно перероблені шляхом механічного подрібнення до заданої фракції, придатної для вторинного використання в циклах екструзії, лиття або виготовлення композитів. У роботі визначено основні джерела полімерних відходів: дефектні та браковані вироби, допоміжні структури для 3D-друку (support, brim, raft), залишки філаменту, обрізки ущільнювальних матеріалів, залишки підошов, задників, носиків, а також багатошарові компоненти із відбракованих виробів. Зроблено огляд класифікації сучасного подрібнювального обладнання, яке умовно поділяється на лабораторні, побутові/напівпромислові та промислові подрібнювачі залежно від потужності, продуктивності та конструктивних особливостей. Окрема увага у статті приділена конструкції, принципу дії та технічним характеристикам компактного подрібнювача Epo3D, який застосовано для подрібнення відходів ABS+ пластику, що залишилися після 3D-друку. Уточнено склад вузлів пристрою, включно з бункером, роторно-ножовим валом, ситом та контейнером для збору подрібненого матеріалу. Результати експерименту підтвердили здатність пристрою забезпечити стабільну та рівномірну роботу з одержанням фракції розміром до 0,5 мм. Застосування Epo3D дає змогу створювати локальні системи рециркуляції полімерів, що є економічно вигідним і екологічно доцільним рішенням для малих виробництв та навчальних лабораторій. Таким чином, запропоноване технічне рішення сприяє зменшенню навантаження на навколишнє середовище, раціональному використанню ресурсів і формуванню замкнутого циклу матеріалів у сфері легкої промисловості та 3D-технологій.

Ключові слова: *подрібнювач полімерів, міні-шредер, переробка відходів, 3D-друк, полімери, вторинна сировина, Epo3D, подрібнення ABS+.*

The article addresses the pressing issue of polymer waste accumulation resulting from the intensive development of additive manufacturing technologies (particularly FDM printing) and from processes in the light industry, such as garment, footwear, and leather goods manufacturing. It has been shown that this waste consists of technically valuable polymers, including ABS, PLA, PETG, EVA, and others, which can be effectively processed by mechanical shredding into specified particle sizes suitable for secondary use in extrusion, molding, or composite production. The study identifies the primary sources of polymer waste: defective and rejected products; support structures used in 3D printing (support, brim, raft); filament remnants; trimmings of sealing materials; sole fragments; heel counters; toe puffs; and multilayer components from discarded items. A classification of modern shredding equipment is provided, divided into laboratory, household/semi-industrial, and industrial shredders based on power, productivity, and design features. Attention in the article is given to the design, operating principle, and technical specifications of the compact Epo3D shredder, which was applied to shred ABS+ plastic waste generated during 3D printing. The configuration of the device components is clarified, including the hopper, rotary cutting shaft, screen, and collection container for the shredded material. Experimental results confirmed the device's consistent, uniform operation, achieving particle sizes up to 0.5 mm. The use of Epo3D enables the creation of localized polymer recycling systems, which is an economically beneficial and environmentally sound solution for small-scale manufacturing and educational laboratories. Thus, the proposed technical approach contributes to reducing environmental impact, ensuring rational resource use, and establishing a closed-loop materials cycle within the light industry and 3D technology sectors.

Keywords*: polymer shredder, mini shredder, waste recycling, 3D printing, polymers, secondary raw material, Epo3D, ABS+ shredding.*

Вступ

На сучасному етапі розвитку технологій адитивного виробництва (3D-друку) та автоматизованих технологічних процесів у легкій промисловості особливої актуальності набуває проблема переробки полімерних відходів. Враховуючи зростаючий обсяг використання полімерних матеріалів як у цифровому виробництві (зокрема, FDM-друк), так і в традиційних галузях (наприклад, взуттєве і швейне виробництво), різко збільшується кількість відходів, які потребують утилізації [1]. Без відповідної системи збирання, сортування та переробки такі відходи становлять загрозу для довкілля, сприяючи накопиченню побутового та промислового сміття з низькою біодеградацією.

Полімерні матеріали є високовартісними технічними ресурсами, виготовленими з обмеженої нафтохімічної сировини. Їхнє безконтрольне витрачання призводить до ресурсних втрат і збільшення собівартості виробів. Повторне використання полімерних залишків шляхом механічного подрібнення та повторної екструзії дозволяє зменшити потребу у первинній сировині, скоротити витрати на виробництво й зменшити об'єми відходів, що вивозяться на полігони. Це своєю чергою формує основи для створення замкнутого циклу обігу матеріалів у виробничому середовищі – ключового принципу сучасної циркулярної економіки [2].

© Поліщук Андрій Олегович, Поліщук Олег Степанович, Скиба Микола Єгорович, Поліщук Олег, 2025

У сфері 3D-друку основними джерелами утворення полімерних відходів є: дефектні вироби, що виникають через помилки калібрування, обрив друку, збої температурного режиму або помилки у G-коді; підтримувальні структури (supports), які необхідні для друку нависань, але після завершення друку видаляються; технічні шари - “raft”, “brim”, “skirt”, які покращують зчеплення з платформою, але не є частиною готового виробу; залишки філаменту після заміни катушки, очищення сопла або тестового друку.

Рис. 1. Відходи пластику ABS+, що утворилися під час 3D-друку

Типовий приклад – відходи пластику ABS+ після багатосерійного друку корпусних деталей чи макетів, що накопичуються у вигляді уламків, ниток, пластин або об’ємних заготовок (рис. 1) [3].

Паралельно значні об’єми полімерних відходів утворюються у легкій промисловості, особливо у взуттєвій, шкіргалантарейній та текстильній галузях. Тут основними джерелами полімерних залишків є такі: обрізки підкладкових та ущільнювальних матеріалів (ТПЕ, ПВХ, латекс тощо), що формуються під час розкрою деталей верху взуття; залишки підошовних композицій – поліуретанових, термопластичних або гумових, які не використані або дефектні після лиття; виробничий брак – недоформовані носики, задники, формувальні елементи або ущільнення; відпрацьовані елементи після демонтажу зношеного взуття, які складаються з багатошарових полімерів, іноді з армуванням або текстильною підкладкою.

Ці залишки за умови належної підготовки (миття, сушіння, подрібнення) можуть бути повторно використані як технічна або вторинна сировина – наприклад, у вигляді грануляту для термопластавтоматів, наповнювачів для лиття під тиском, сировини для 3D-філаментів або армованих композитів.

Таким чином, наявність ефективного, недорогого та енергоощадного пристрою для подрібнення полімерних відходів – як після 3D-друку, так і з циклів легкої промисловості – є стратегічно важливою задачею. Такий пристрій дозволить формувати локальні системи повторної переробки, що не лише мінімізуватимуть втрати ресурсів, а й сприятимуть зменшенню вуглецевого сліду виробництва. Його застосування особливо буде доцільним у навчальних майстернях, малих цехах, лабораторіях, підприємствах з обмеженим доступом до централізованих систем утилізації.

Формулювання цілей статті

Об’єктом дослідження є процес механічного подрібнення полімерних відходів із застосуванням міні-шредера Epo3D. Для досягнення цілей дослідження використано експериментальний метод, що включав підготовку проб ABS+ пластику, налаштування обладнання, вимірювання фракційності та оцінку однорідності отриманих часток. Контрольні параметри – діаметр отворів сита, швидкість обертання вала, продуктивність та якість подрібнення.

Метою роботи є обґрунтування вибору та перевірка ефективності використання подрібнювального пристрою для полімерних відходів у локальних умовах, зокрема у виробництві та навчальних лабораторіях. Основні задачі включають аналіз існуючого обладнання для подрібнення полімерів, визначення оптимальних технічних параметрів для подрібнення відходів 3D-друку, дослідження роботи міні-шредера Epo3D при зміні конструкції сита, оцінку якості подрібненого матеріалу та його придатність до вторинної переробки

Виклад основного матеріалу дослідження

Процес подрібнення полімерних відходів є критичним і технологічно важливим етапом підготовки вторинної сировини до повторної переробки або рециклінгу. Подрібнення дозволяє зменшити габарити та об’єм виробничих залишків, забезпечити однорідність частинок, а також підвищити ефективність подальших операцій – екструзії, лиття під тиском, пресування, термоформування чи повторного виробництва філаменту для 3D-друку.

Для виконання цієї задачі використовується спеціалізоване подрібнювальне обладнання, яке забезпечує механічне руйнування полімерних матеріалів до фракцій розміром 0,5–12 мм залежно від конструкції машини та встановлених сит [4–9]. За принципом дії та сферою застосування таке обладнання умовно поділяється на декілька основних груп:

1. Лабораторні подрібнювачі. Ці пристрої призначені для подрібнення малих кількостей полімерних відходів у рамках дослідницьких проєктів, експериментів або в освітньому середовищі. Вони мають малу продуктивність (до 5 кг/год), спрощену конструкцію, часто обладнані ручним або напівавтоматичним завантаженням. Здебільшого такі подрібнювачі працюють з PLA, ABS, HIPS та подібними легкоплавкими матеріалами.

Приклади: Filabot Reclaimer – подрібнювач для лабораторного використання, інтегрується з екструдером Filabot; Shr3d It – пристрій для домашньої та навчальної переробки з можливістю прямого завантаження до екструдера.

2. Побутові або напівпромислові подрібнювачі. Цей тип подрібнювачів призначений для малих виробництв, майстерень, центрів прототипування, шкільних або університетських лабораторій, а також для індивідуальних користувачів, які займаються переробкою залишків відходів. Такі пристрої мають продуктивність у межах 10–25 кг/год, оснащуються роторно-ножовими механізмами, електродвигунами потужністю до 1,5 кВт, та дають можливість працювати з твердими і м’якими полімерними матеріалами: ABS, PLA, PETG, EVA, поліуретанами, ПВХ, поліамідом.

Особливостями устаткування є компактність, простота обслуговування; наявність змінних сит для регулювання фракції; можливість інтеграції у замкнені цикли рециклінгу.

3. Промислові шредери та дробарки. Ці машини призначені для обробки великих об’ємів полімерних відходів, у тому числі багатошарових або армованих, а також компонентів, що містять домішки (тканини, гуму тощо). Продуктивність промислових подрібнювачів може досягати 300–1000 кг/год. Вони використовуються при переробці термопластичних та термореактивних залишків, а також для підготовки сировини для вторинного гранулювання.

Типові конструктивні рішення: двохвальні системи (для грубого подрібнення). валково-ножові механізми

(для більш точної фракції), молоткові подрібнювачі (для крихких або жорстких полімерів).

Додаткові функції: автоматична подача матеріалу; інтеграція з транспортером, циклоном або завантажувачем; автоматичне блокування при перевантаженні.

Серед рішень побутового й напівпромислового рівня особливу увагу заслуговує Epo3D – інженерно адаптований подрібнювач, орієнтований на малосерійне подрібнення відходів з адитивного виробництва, а також полімерних матеріалів, що утворюються у процесах у легкій промисловості, зокрема у швейному та взуттєвому виробництві. Саме його було використано для механічної переробки полімерних відходів, що утворюються як у процесі 3D-друку, так і у виробництві в галузі легкої промисловості (зокрема, у швейній та взуттєвій сферах) [10]. Пристрій належить до класу одновальних роторно-ножових міні-шредерів і призначений для дроблення твердих термопластичних матеріалів з метою подальшого їх повторного використання або рециклінгу.

Основними технічними характеристиками міні-шредера є: максимальна частота обертання подрібнюючого вала – n = 15 об/хв; потужність електродвигуна – 180 Вт.

Більш детальні технічні параметри шредера наведено у роботі [10]. Загальний вигляд пристрою разом з його основними елементами представлено на рис. 2.

Конструктивна схема та принцип дії. Шредер має одновальний привід і працює за принципом поетапного різання і просіювання полімерного матеріалу до заданої фракції (рис. 2). Відходи полімеру завантажуються у бункер (1), де можуть мати різну форму – шматки, стрічки, гранули, литі фрагменти тощо (рис. 3).

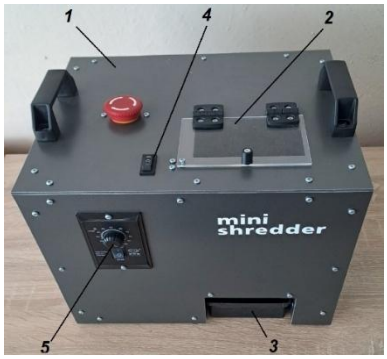


Рис. 2. Міні-шредер для подрібнення полімерних відходів: 1 – завантажувальний бункер; 2 – контейнер для збирання подрібненого матеріалу; 3 – регулятор частоти обертання ріжучого вала

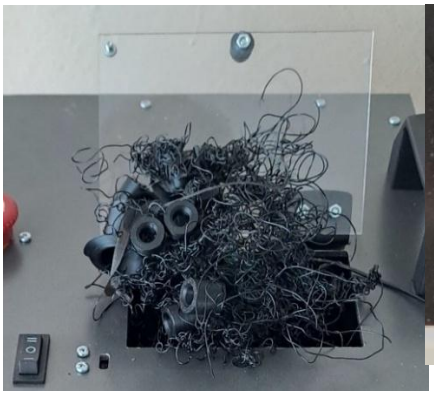


Рис. 3. Завантажувальний бункер з полімерними відходами

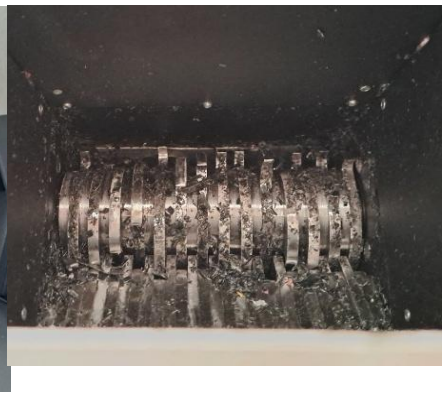
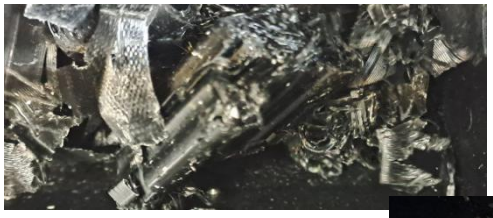


Рис. 4. Ріжучий механізм шредера

У внутрішній камері розміщений ріжучий вал, оснащений багатолезовими ножами, що забезпечують зусилля різання, роздавлювання або стирання (рис. 4). У корпусі шредера встановлено протирізальні пластини (гребінки), які взаємодіють з ножами, створюючи ефект зустрічного ножового зсуву. Це дозволяє ефективно дробити навіть жорсткі або еластомерні полімери.

Рис. 5. Контейнер із подрібненими полімерними частками



а – завантаження матеріалу у бункер;

б – процес захоплення ножами

Рис. 6. Процес подрібнення ABS+ пластику:

У нижній частині корпусу встановлюється сито, яке виконує функцію калібрування часток. Частки полімеру, що відповідають діаметру отворів (стандартно – 6 мм), проходять крізь сітку та накопичуються в контейнері для збору (2). Частки більшого розміру рециркулюються та знову захоплюються ножами для додаткового подрібнення.

Для проведення експериментального подрібнення було відібрано відходи ABS+ пластику, отримані внаслідок бракованих або допоміжних елементів 3D-друку (support-структури, brim, raft, дефектні моделі). Процес подрібнення здійснювався у декілька етапів. Початкове подрібнення виконувалося при використанні стандартного сита з отворами діаметром 6 мм. З метою отримання тоншої фракції (≤2,5 мм) у шредері було встановлено додаткову сітку з отворами 3 мм, що дозволило досягти необхідного розміру часток.

У результаті експерименту було отримано рівномірні частки подрібненого полімеру, придатні для подальшої екструзії або грануляції. Отримана фракція характеризується однорідністю, чіткими межами та низькою кількістю надлишкового пилу, що свідчить про стабільність роботи ріжучого механізму (рис. 7). Загалом, використання міні-шредера Epo3D у виробничих умовах продемонструвало його ефективність для локальної переробки полімерних відходів. Пристрій забезпечив високу якість подрібнення при мінімальному енергоспоживанні та невеликій шумовій

потужності, що дозволяє використовувати його у навчальних лабораторіях, майстернях, наукових центрах, а також у міні-виробництвах, орієнтованих на повторне використання філаменту та полімерної сировини.

Рис. 7. Подрібнені частки ABS+ пластику, отримані з відходів 3D-друку

Висновки та перспективи подальших розвідок

У результаті проведеного дослідження встановлено, що застосування міні-шредера Epo3D є ефективним рішенням для переробки полімерних відходів, зокрема залишків, що утворюються під час 3D-друку та у процесах легкої промисловості. Подрібнення до заданої фракції дозволяє отримати вторинну сировину, придатну для подальшої екструзії, грануляції або виготовлення композитних матеріалів, що відкриває можливості для замкненого циклу матеріалів.

Експериментально доведено, що обладнання забезпечує стабільну роботу та рівномірність подрібнення. Встановлення сит із різними діаметрами отворів дозволяє регулювати фракційний склад отриманого матеріалу.

Високий рівень технологічної надійності, низьке енергоспоживання, компактність конструкції та можливість швидкого очищення і технічного обслуговування роблять шредер Epo3D придатним для використання у малих виробництвах, навчальних лабораторіях, дослідницьких центрах та освітніх установах. Таке обладнання дозволяє значно знизити витрати на закупівлю первинної сировини, зменшити кількість відходів, що вивозяться на полігони, та сприяє формуванню екологічно орієнтованих виробничих процесів.

Отже, впровадження подібних рішень у практику переробки полімерів є доцільним як з екологічної, так і з економічної точки зору. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на автоматизацію подачі сировини, модернізацію ножового механізму, а також адаптацію подрібнювача до обробки багатошарових або армованих полімерів.

Література

1. Рубанка М. М., Місяць В. П. Відходи легкої промисловості, способи переробки та області подальшого використання. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки*. 2015. № 4 (88). С. 34–39.
2. Поліщук А. О., Скиба М. Є., Поліщук О. С. Перспективи розробки обладнання для подрібнення відходів 3D-друку. *Мехатронні системи: інновації та інжиніринг*: тези доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 2023). Київ: КНУТД, 2023. – С. 115–116.
3. Поліщук А.О. Розробка системи охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера. Технології та інжиніринг. 2023. № 6. DOI: https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.6.5.
4. Місяць В. П. Моделювання процесу різання гум і термопластичних матеріалів між двома ножами в роторних дробарках. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2007. № 5. С. 145–149.
5. Скиба М. Є. Наукові основи ресурсозберігаючих технологій переробки відходів натуральних шкір у матеріали та вироби взуттєвого виробництва: дис. ... д-ра техн. наук: 05.19.06. Київський національний університет технологій та дизайну. Київ, 2004. 418 с.
6. Скиба М. Є. Обладнання для переробки відходів. Хмельницький: ПП Ковальський В. В., 2004. 124 с.
7. Місяць В. П. Розвиток наукових основ проєктування обладнання для подрібнення відходів термопластичних і гумових матеріалів легкої промисловості: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.10. Київ, 2008. 365 с.
8. Мікульонок І. О., Карвацький А. Я., Лелека С. В., Іваненко О.І. Валкові дробарки і млини (огляд конструкцій). *Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. 2022. № 1. С. 30–43. DOI: : https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2022.254157.
9. Місяць В. П., Бурмістенков О. П., Гладчук О. З. Моделювання процесів руйнування полімерних матеріалів при подрібненні. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну.* 2007. № 3. С. 40–45.
10. Подрібнювач Mini Shredder. URL: https://epo3d.com/uk/katalog/shreder/razmelchitel-mini-sredder-.html.

References

1. Rubanka, M. M., & Misiats, V. P. (2015). Vidkhody lehkoi promyslovosti, sposoby pererobky ta oblasti podalshoho vykorystannia [Waste of light industry, methods of processing and areas of further use]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Seriia: Tekhnichni nauky*, No. 4(88), Pp. 34–39.
2. Polishchuk, A. O., Skyba, M. Ye., & Polishchuk, O. S. (2023). Perspektyvy rozrobky obladnannia dlia podribnennia vidkhodiv 3D-druku [Prospects for the development of equipment for grinding 3D printing waste]. In *Mekhatronni systemy: innovatsii ta inzhynirynh: tezy dopovidei VII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (Kyiv, 2023), Pp. 115–116. Kyiv: KNUTD.
3. Polishchuk, A. O. (2023). Rozrobka systemy okholodzhennia korpusu shnekovoho ekstrudera 3D-pryntera [Development of a cooling system for the housing of a screw extruder of a 3D printer]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh*, No. 6. https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.6.5.
4. Misiats, V. P. (2007). Modeliuvannia protsesu rizannia hum i termoplastychnykh materialiv mizh dvoma nozhamy v rotornykh drobarkakh [Modeling of the cutting process of rubber and thermoplastic materials between two knives in rotary crushers]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*, No. 5, Pp. 145–149.
5. Skyba, M. Ye. (2004). *Naukovi osnovy resursozberihaiuchykh tekhnolohii pererobky vidkhodiv naturalnykh shkir u materialy ta vyroby vzuttievoho vyrobnytstva* [Scientific foundations of resource-saving technologies for processing natural leather waste into materials and footwear products] (Doctoral dissertation). Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv.
6. Skyba, M. Ye. (2004). *Obladnannia dlia pererobky vidkhodiv* [Equipment for waste processing]. Khmelnytskyi: PP Kovalskyi V. V.
7. Misiats, V. P. (2008). *Rozvytok naukovykh osnov proiektuvannia obladnannia dlia podribnennia vidkhodiv termoplastychnykh i humovykh materialiv lehkoi promyslovosti* [Development of scientific foundations for designing equipment for grinding thermoplastic and rubber waste of the light industry] (Doctoral dissertation). Kyiv.
8. Mikulonok, I. O., Karvatskyi, A. Ya., Leleka, S. V., & Ivanenko, O. I. (2022). Valkovi drobarky i mlyny (ohliad konstruktsii) [Roll crushers and mills (design review)]. *Visnyk NTUU "KPI imeni Ihoria Sikorskoho". Seriia: Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia*, No. 1, Pp. 30–43. https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2022.254157.
9. Misiats, V. P., Burmistenkov, O. P., & Hladchuk, O. Z. (2007). Modeliuvannia protsesiv ruinuvannia polimernykh materialiv pry podribnenni [Modeling of polymer material destruction processes during grinding]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu*, No. 3, Pp. 40–45.
10. Mini Shredder. (n.d.). *Podribniuvach Mini Shredder* [Mini Shredder]. Available at: https://epo3d.com/uk/katalog/shreder/razmelchitel-mini-sredder-.html.

Стаття надійшла до редакції / Received 18.10.2025 Прийнята до друку / Accepted 02.11.2025