

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-84>

УДК 678.08

ПОЛІЩУК ОЛЕГ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0005-0897-6272>

e-mail: oleg2402pol@gmail.com

СКИБА МИКОЛА

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0006-1451-4186>

e-mail: mykolaskybaxnu@gmail.com

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ШРЕДЕРА ДЛЯ ПОДРІБНЕННЯ ВІДХОДІВ PETG-ПЛАСТИКУ, ЩО УТВОРЮЮТЬСЯ ПІД ЧАС 3D-ДРУКУ

У статті наведено результати дослідження процесу подрібнення відходів PETG-пластику, що утворюються під час FDM 3D-друку, з метою їх подальшого повторного використання у складі вторинної сировини для 3D-принтерів зі шнековим екструдером. Актуальність роботи зумовлена необхідністю зменшення об'ємів полімерних відходів, підвищення ефективності локальної переробки та формування замкненого технологічного циклу в адитивному виробництві. Як об'єкт дослідження обрано відходи PETG-пластику складної морфології, які характеризуються наявністю стрічкоподібних, контурних та еластичних елементів, що ускладнюють їх подальшу безпосередню подачу в екструзійне обладнання. Для механічної переробки було використано одновальний міні-шредер, конструкція якого забезпечує низькообертний режим роботи, високий крутний момент та стабільне руйнування полімерного матеріалу без критичного перегріву і намотування на робочі органи. У роботі послідовно описано процес завантаження відходів у приймальний бункер, їх подрібнення ножовим механізмом та накопичення отриманого матеріалу у приймальній контейнері. Показано, що обрана схема подрібнення забезпечує стабільне формування дрібно- та середньофракційного матеріалу, придатного для подальшої переробки. Після подрібнення виконано ситовий аналіз, за результатами якого було виділено фракцію, що відповідає вимогам до сировини для шнекового екструдера 3D-принтера. Частинок, які не відповідали встановленим розмірам, було повернуто на повторне подрібнення, що дало змогу реалізувати замкнений цикл підготовки вторинного матеріалу. Отримані результати підтверджують доцільність використання одновального шредера для підготовки PETG-відходів до повторної екструзії та демонструють практичну можливість впровадження такого підходу в технологіях переробки полімерів для адитивного виробництва.

Ключові слова: 3D-друк, FDM, PETG-пластик, полімерні відходи, одновальний шредер, подрібнення, ситовий аналіз, вторинна сировина, шнековий екструдер, рециклінг.

POLISHCHUK OLEG, SKYBA MYKOLA

Khmelnytskyi National University

JUSTIFICATION OF THE CHOICE AND EXPERIMENTAL STUDY OF A SHREDDER FOR CRUSHING PETG PLASTIC WASTE FORMED DURING 3D PRINTING

The article presents the results of a study of the shredding process of PETG plastic waste generated during FDM 3D printing with the aim of its further reuse as secondary raw material for 3D printers equipped with a screw extruder. The relevance of the research is driven by the need to reduce the volume of polymer waste, improve the efficiency of local recycling, and establish a closed-loop technological cycle in additive manufacturing. As the object of the study, PETG plastic waste of complex morphology was selected. Such waste is characterized by strip-like, contour, and elastic elements, which complicate its direct feeding into extrusion equipment and require preliminary mechanical preparation. For this purpose, a single-shaft mini-shredder was used, whose design ensures low-speed operation, high torque, and stable destruction of the polymer material without critical overheating or entanglement on the working components. The research consistently describes the loading of waste into the receiving hopper, shredding by the knife mechanism, and the accumulation of the processed material in the collection container. It was shown that the selected shredding scheme provides stable formation of fine- and medium-sized particles suitable for further processing. After shredding, sieve analysis was carried out, and as a result, the fraction meeting the requirements for feedstock for a screw extruder of a 3D printer was separated. Particles that did not meet the specified size criteria were returned for repeated shredding, which made it possible to implement a closed cycle for the preparation of secondary material. The obtained results confirm the feasibility of using a single-shaft shredder for preparing PETG waste for re-extrusion and demonstrate the practical potential of applying this approach in polymer recycling technologies for additive manufacturing.

Keywords: 3D printing, FDM, PETG plastic, polymer waste, single-shaft shredder, shredding, sieve analysis, secondary raw material, screw extruder, recycling.

Стаття надійшла до редакції / Received 17.03.2026

Прийнята до друку / Accepted 14.04.2026

Опубліковано / Published 28.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Поліщук Олег, Скиба Микола

Вступ

Сучасний розвиток адитивних технологій, зокрема FDM 3D-друку, не лише розширює можливості виготовлення деталей і виробів, а й створює проблему накопичення полімерних відходів. У процесі друку утворюються браковані вироби, підтримувальні структури, обрізки, залишки філаменту та елементи, що втратили експлуатаційну цінність. Зі зростанням кількості 3D-принтерів у лабораторіях, навчальних закладах і малих виробництвах потреба в ефективних локальних технологіях повторного використання таких відходів постійно зростає.

Одним із найбільш поширених матеріалів у FDM-друці є PETG-пластик [1]. Його перевагами є висока міцність, ударна в'язкість, технологічність друку, низька усадка та хімічна стійкість. Водночас саме ці властивості ускладнюють механічну переробку, оскільки PETG-відходи часто мають високу пружність, пластичну деформацію та утворюють довгі стрічкоподібні або кільцеподібні елементи, незручні для повторного завантаження в обладнання. Це зумовлює необхідність попереднього подрібнення до стабільної фракції, придатної для транспортування, дозування, плавлення та екструзії.

У дослідженнях, присвячених удосконаленню 3D-друку, значна увага приділяється використанню вторинної полімерної сировини для шнекових екструдерів [2]. Це дає змогу зменшити собівартість друку, скоротити витрати на первинну сировину та знизити навантаження на довкілля. Водночас ефективність такого підходу залежить від якості підготовки вторинного матеріалу, зокрема від розміру частинок, однорідності фракційного складу та відсутності термічної деградації під час подрібнення. Тому вибір шредера є важливим етапом у формуванні замкнутого циклу переробки полімерів в адитивному виробництві. Для подрібнення полімерних матеріалів можуть застосовуватися різні типи машин: роторні дробарки, валкові подрібнювачі, ножові млини, двовальні та одновальні шредери. Кожен із них має свої переваги й обмеження залежно від властивостей матеріалу, форми відходів, продуктивності та вимог до кінцевої фракції. Для PETG-відходів, які мають неоднорідну форму, стрічки та контурні залишки, високошвидкісні дробарки не завжди працюють стабільно через намотування матеріалу, перевантаження приводу або локальний перегрів. У зв'язку з цим постає завдання обґрунтування конструкції шредера, яка забезпечувала б надійне захоплення відходів, достатнє зусилля різання, стабільне вивантаження подрібненого матеріалу та мінімізацію енерговитрат.

Актуальність роботи також пов'язана з тим, що локальна переробка відходів 3D-друку безпосередньо в місці їх утворення є одним із найреалістичніших шляхів підвищення ресурсоефективності малих виробництв і лабораторій. На відміну від централізованої переробки, локальне подрібнення та повторне використання полімеру не потребують складної логістики, дають змогу оперативно повертати відходи у виробничий цикл і створюють передумови для енергоощадних та екологічно орієнтованих технологічних систем. Метою статті є обґрунтування вибору шредера для подрібнення відходів PETG-пластику з урахуванням їх форми, фізико-механічних властивостей і вимог до фракційного складу подрібненої сировини для подальшого використання в екструзійному обладнанні.

Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес подрібнення відходів PETG-пластику, що утворюються під час FDM 3D-друку, з подальшим ситовим просіюванням отриманого матеріалу та виділенням фракції, придатної для повторного використання у 3D-принтерах зі шнековим екструдером. Методологія базується на експериментальному дослідженні робочого процесу одновального шредера, аналізі морфології вихідних відходів, оцінці фракційного складу подрібненого матеріалу.

Постановка завдання

Основним завданням дослідження є експериментальне обґрунтування застосування одновального шредера для подрібнення відходів PETG-пластику, що утворюються під час 3D-друку, та оцінка придатності отриманої фракції для подальшого використання в 3D-принтерах зі шнековим екструдером. Дослідження передбачає аналіз морфології вихідних відходів, перевірку ефективності їх завантаження і подрібнення на вибраному шредері, проведення ситового аналізу отриманого матеріалу та відокремлення фракції, яка відповідає вимогам до вторинної сировини для шнекового екструдера 3D принтера.

Результати та їх обговорення

Як об'єкт для дослідження було обрано відходи PETG-пластику, що утворюються під час 3D-друку за технологією FDM. На рис.1 представлено зовнішній вигляд вихідної полімерної сировини, яка за своєю морфологічною структурою є сукупністю неоднорідних елементів: контурних залишків, підтримувальних структур та фрагментів невдалих друкованих моделей.

Аналіз наведених зразків свідчить, що PETG-відходи мають складну конфігурацію, характеризуються високою жорсткістю та еластичністю, що суттєво відрізняє їх від крихких полімерів, таких як PLA. Наявність стрічкоподібних елементів та замкнутих контурів створює значні перешкоди при завантаженні в пристрій подрібнення, оскільки такі форми схильні до зачеплення та утворення затворів у приймальному бункері шредера. Така морфологія вимагає використання ріжучого механізму з високим крутним моментом та спеціальною геометрією ножових елементів, здатною забезпечувати надійне захоплення та розрізання полімеру без надмірного виділення теплоти тертя, що важливо для уникнення передчасної деструкції матеріалу.

Для проведення експериментальних досліджень із подрібнення відходів PETG-пластику було обрано та використано одновальний міні-шредер, загальний вигляд якого представлено на рис.2 [3].

Вибір даної конструкції зумовлений її високою ефективністю при переробці в'язких полімерів та компактними габаритами, що робить її оптимальною для локальних циклів рециклінгу. Конструктивно установка базується на застосуванні низькообертового одновального ріжучого механізму, де основними робочими органами є ротор із закріпленими ножами та нерухомі контрножі, розміщені у корпусі подрібнювача. Така схема реалізації процесу подрібнення забезпечує стабільну взаємодію між ріжучими елементами, що дозволяє отримувати частинки з чітко контрольованим фракційним складом завдяки наявності калібрувальної сітки з заданим розміром комірок, розташованої безпосередньо під робочою зоною ротора.



Рис.1. Вихідні відходи PETG-пластику, що утворюються під час FDM 3D-друку



Рис.2 Загальний вигляд шредера для подрібнення PETG-відходів

Система керування міні-шредером обладнана вбудованим блоком регулювання обертів двигуна з підтримкою зворотного зв'язку, що дозволяє оператору оптимізувати частоту обертання вала відповідно до морфології та в'язкості полімерного матеріалу. Це забезпечує можливість роботи у низькооберттовому діапазоні, що є критично важливим для запобігання термічній деструкції полімеру в процесі подрібнення, оскільки надмірне виділення теплоти тертя може призвести до небажаного розм'якшення та злипання частинок, що негативно впливає на подальший екструзійний цикл.

Силевий привід установки включає електродвигун та редуктор, які забезпечують створення високого крутного моменту, необхідного для розрізання жорстких та неоднорідних фрагментів відходів 3D-друку. Компактне виконання установки та наявність системи захисту від перевантаження, зокрема аварійної кнопки зупинки та датчиків контролю струму, забезпечують надійність роботи та безпеку в експлуатації під час тривалих циклів переробки. Використання одновального шредера такої конструкції дозволяє досягти стабільної продуктивності подрібнення при мінімальних енерговитратах, що підтверджує доцільність його впровадження у виробничі комплекси для локальної вторинної переробки пластмас, де вимоги до енергоефективності та якості отриманої сировини є визначальними факторами.

Процес підготовки та безпосереднього подрібнення відходів PETG-пластику здійснювався шляхом їх завантаження у приймальний бункер шредера (рис.3).

Як видно з наведеного рисунку, геометрична форма відходів, що утворюються під час 3D-друку, має виражений неоднорідний характер: це переважно стрічкоподібні структури та контурні залишки, які потребують акуратного розміщення у робочій зоні для забезпечення стабільного захоплення ножовим блоком. Для уникнення утворення «містків» над ротором та запобігання заклинюванню, завантаження матеріалу виконувалося порційно, що дозволило досягти стабільної подачі сировини до зони дроблення без критичних перевантажень електродвигуна.

Такий підхід до організації завантаження є суттєвим для забезпечення належної якості подрібнення, оскільки він дозволяє валу шредера рівномірно захоплювати фрагменти полімеру та ефективно їх дробити до розмірів, визначених калібрувальною сіткою. Використання прозорої кришки бункера дозволяло візуально контролювати процес дроблення в режимі реального часу, своєчасно здійснюючи корекцію швидкості подачі матеріалу залежно від поточної конфігурації залишків, що завантажуються. Завдяки дотриманню такої технологічної дисципліни вдалося досягти стабільного функціонування установки та уникнути зупинок, спричинених намотуванням в'язких відходів PETG на робочі органи ротора, що підтверджує доцільність обраного методу керування завантаженням при переробці подібних полімерних відходів.

На рис.4 показано процес подрібнення відходів PETG-пластику ножовим механізмом шредера. Під час роботи установки полімерний матеріал, що був попередньо завантажений у бункер, захоплюється ріжучими ножами ротора та поступово переміщується до зони інтенсивного різання. Внаслідок взаємодії рухомих і нерухомих ріжучих елементів відбувається послідовне руйнування стрічкоподібних та контурних фрагментів відходів до частинок меншого розміру, придатних для подальшого використання як вторинної сировини. Спостереження за роботою шредера засвідчило, що навіть за наявності еластичних і частково згорнутих елементів PETG матеріал ефективно захоплюється ріжучим вузлом без значного намотування на вал, що підтверджує доцільність вибраної одновальної схеми подрібнення.



Рис.3. Процес завантаження пластикових відходів у бункер шредера



Рис. 4. Процес подрібнення ножами відходів PETG-пластику

У результаті роботи шредера отримано подрібнений PETG-матеріал, який накопичується у приймальному контейнері після проходження через ріжучий вузол. Як видно на рис.5, фракція має переважно дрібно- та середньорозмірну структуру, сформовану з нерегулярних пластинчастих і ламелярних частинок, що є типовим результатом ножового подрібнення полімерних відходів. Візуально встановлено, що подрібнений матеріал не містить довгих стрічкоподібних елементів, які були характерні для вихідних відходів, а отже процес подрібнення відбувся достатньо повно та стабільно.



Рис.5. Подрібнений PETG-матеріал після проходження через шредер

Після завершення процесу подрібнення було проведено ситовий аналіз отриманого матеріалу з використанням набору сит (рис.6) [4]. Застосування ситового аналізу дало змогу розподілити подрібнений PETG-матеріал за фракціями та виділити ту частину частинок, геометричні розміри яких є придатними для подальшого використання в 3D-принтерах зі шнековим екструдером (рис.7) [5, 6].

Такий підхід є важливим з технологічної точки зору, оскільки надмірно великі або нерівномірні за формою частинки можуть ускладнювати подачу матеріалу в зону плавлення, спричиняти нестабільність продуктивності шнека та негативно впливати на якість екструзії.

У результаті ситового просіювання було відібрано фракцію, придатну для повторної переробки, тоді як залишки матеріалу, що не відповідали встановленим вимогам за розміром, піддавали повторному подрібненню. Це дозволило реалізувати замкнений цикл підготовки вторинної сировини та підвищити ефективність використання відходів PETG-пластику в технологіях адитивного виробництва.



Рис.6. Набір сит для ситового аналізу



Рис.7. Розподіл подрібненого PETG-матеріалу за фракціями

Висновки

У результаті проведеного дослідження встановлено, що відходи PETG-пластику, які утворюються під час FDM 3D-друку, мають складну морфологію та потребують попереднього подрібнення перед повторним використанням. Їхня стрічкоподібна, контурна та еластична форма ускладнює безпосереднє завантаження в екструзійне обладнання, тому застосування шредера є технологічно доцільним етапом підготовки вторинної сировини. Експериментально підтверджено, що одновальний міні-шредер забезпечує ефективне подрібнення таких відходів за умови стабільної порційної подачі матеріалу в приймальний бункер. Низькообертовий режим роботи та наявність високого крутного моменту ріжучого механізму дозволяють уникнути намотування полімеру, заклинювання робочих органів і критичного перегріву матеріалу під час дроблення. Після подрібнення було проведено ситовий аналіз отриманої фракції, що дало змогу виділити частинки, придатні для подальшого використання в 3D-принтерах зі шнековим екструдером. Частинки, які не відповідали встановленим вимогам за розміром, були повернуті на повторне подрібнення, що забезпечило реалізацію замкненого циклу підготовки вторинної сировини. Отримані результати підтверджують доцільність використання одновального шредера для локальної переробки PETG-відходів та показують практичну можливість їх повторного залучення у технології адитивного виробництва. Це створює передумови для зменшення обсягів полімерних відходів і підвищення ресурсоефективності процесу 3D-друку.

Література

1. Що таке PETG пластик: особливості, характеристики та застосування [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://techfil.com.ua/shcho-take-petg-plastyk-osoblyvosti-kharakterystyky-ta-zastosuvannia/>.
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 наук.-практ. конф. / Київ : КНУТД, 2023. С.115-116.
3. Подрібнювач Mini Shredder + [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://epo3d.com/uk/katalog/shreder/razmelchitel-mini-sredder-.html>.
4. Сита лабораторні. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://surl.li/oaof>.
5. Misiats O., Misiats V., Rubanka M., Polishchuk A., Skyba M. Determination of bulk density of mixtures of fractions of crushed polymeric materials. Actual problems of modern science. Monograph: edited by Matiukh S., Skyba M., Musial J., Polishchuk O. Bydgoszcz (Poland). 2021 2021. pp. 462-466.
6. Рубанка М.М., Місяць В.П. Експериментальні дослідження динаміки роторної дробарки для переробки відходів легкої промисловості / Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки. - 2016. - № 1. - С.27-36.

References

1. What is PETG plastic: features, characteristics and applications Electronic resource]. – Access mode: <https://techfil.com.ua/shcho-take-petg-plastyk-osoblyvosti-kharakterystyky-ta-zastosuvannia/>
2. Polishchuk A.O., Skyba M.Ye., Polishchuk O.S. Prospects for Developing Equipment for Shredding 3D Printing Waste. Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference “Mechatronic Systems: Innovations and Engineering.” Kyiv: KNUTD, 2023. P.115-116.
3. Shredder Mini Shredder + Electronic resource]. – Access mode: <https://epo3d.com/uk/katalog/shreder/razmelchitel-mini-sredder-.html>.
4. Laboratory sieves. Electronic resource]. – Access mode: <http://surl.li/oaof>.
5. Misiats O., Misiats V., Rubanka M., Polishchuk A., Skyba M. Determination of bulk density of mixtures of fractions of crushed polymeric materials. Actual problems of modern science. Monograph: edited by Matiukh S., Skyba M., Musial J., Polishchuk O. Bydgoszcz (Poland). 2021 2021. P.462-466.
6. Rubanka M.M., Misyats V.P. Experimental studies of the dynamics of a rotary crusher for processing light industry waste / Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. Series: Technical Sciences. - 2016. - No. 1. - P.27-36.