

**ПОЛІЩУК АНДРІЙ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7887-7169>e-mail: [andrepol215@gmail.com](mailto:andrepol215@gmail.com)**ПОЛІЩУК ОЛЕГ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-6623-2523>e-mail: [opolishchuk71@gmail.com](mailto:opolishchuk71@gmail.com)**ЛІСЕВИЧ СВІТЛАНА**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5501-9038>e-mail: [lisevichsv@gmail.com](mailto:lisevichsv@gmail.com)**ГОРЯЩЕНКО СЕРГІЙ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-6623-2523>e-mail: [gsl7@ukr.net](mailto:gsl7@ukr.net)**УРБАНЮК ЄВГЕН**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-8713-501X>e-mail: [urbanjuk@gmail.com](mailto:urbanjuk@gmail.com)

## ТЕХНОЛОГІЯ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ ШВЕЙНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ У ВИТРАТНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ 3D-ДРУКУ

У статті описано перспективи використання полімерних відходів швейної промисловості для виготовлення готових виробів методом 3D-друку. Наведено загальну інформацію про відходи, що утворюються в процесі виготовлення готових виробів, зокрема про поліестер та нейлон. Дані матеріали використовуються у різних галузях промисловості для виготовлення готових виробів. Розглянуто їх різновиди та описано характеристики, переваги та недоліки. Наведено існуючі способи переробки відходів полімерних матеріалів, а також етапи виробництва з них полімерних гранул. Зазначено, що механічний рециклінг полімерів є одним із самих перспективних способів переробки відходів полімерних матеріалів. Запропоновано технологію переробки полімерних відходів у готову продукцію методом 3D-друку, яка скорочує кількість операцій для отримання готового виробу порівняно з існуючими. З метою подальших експериментальних досліджень підібрано текстильні матеріали з поліестеру та нейлону для подальшої переробки. Зазначено про актуальність розробки ефективних пристроїв для подрібнення відходів швейної промисловості та методик його проектування. Здійснено подрібнення полімерних відходів швейної промисловості з використанням експериментальної установки, яка дозволяє врахувати всі фактори, які мають вплив на даний процес. Наведено зразки подрібнених полімерних матеріалів. Здійснено підбір обладнання для екструзії подрібнених полімерів. Розроблено та виготовлено конструкцію шнеку екструзійної машини для подачі подрібненого полімеру у вигляді волокон, або малих кусків текстильного матеріалу. Проведено експериментальні дослідження по виготовленню філаменту для 3D-друк з подрібнених полімерів. Визначено оптимальні режими виконання даної технологічної операції на зазначеному устаткуванні. Підтверджено експериментально можливість повторної переробки подрібнених відходів полімерних матеріалів у готові вироби з використанням 3D-принтерів, що використовують в якості вихідної сировини гранули або подрібнені відходи полімерів.

Ключові слова: полімер, рециклінг, поліестер, екструзія, екструдер, 3D-друк, 3D-принтер.

POLISHCHUK ANDRII, POLISHCHUK OLEH, LISEVICH SVITLANA,  
HORIASHCHENKO SERHIY, URBANIUK YEVENH  
Khmelnytskyi National University

## TECHNOLOGY OF WASTE PROCESSING OF THE CLOTHING INDUSTRY INTO CONSUMABLE MATERIALS FOR 3D PRINTING

The article describes the prospects of using polymer waste from the clothing industry for the manufacture of finished products by 3D printing. General information about waste generated in the process of manufacturing finished products, in particular about polyester and nylon, is provided. These materials are used in various industries for the manufacture of finished products. Their varieties are considered and their characteristics, advantages and disadvantages are described. The existing methods of processing waste polymer materials, as well as the stages of production of polymer granules from them, are given. It is noted that mechanical recycling of polymers is one of the most promising methods of processing waste polymer materials. The technology of processing polymer waste into finished products by the 3D printing method is proposed, which reduces the number of operations for obtaining a finished product compared to the existing ones. For the purpose of further experimental research, polyester and nylon textile materials were selected for further processing. The importance of developing effective devices for shredding garment industry waste and its design methods is noted. Grinding of polymer waste from the clothing industry was carried out using an experimental installation that allows taking into account all factors that have an impact on this process. Samples of crushed polymer materials are given. Selection of equipment for extruding crushed polymers has been carried out. The design of the screw of the extrusion machine for feeding crushed polymer in the form of fibers or small pieces of textile material was developed and manufactured. Experimental studies on the production of filament for 3D printing from crushed polymers have been conducted. The optimal modes of performing this technological operation on the specified equipment are determined. It has been experimentally confirmed the possibility of re-processing crushed polymer material waste into finished products using 3D printers that use

*granules or crushed polymer waste as raw materials.*

*Keywords: polymer, recycling, polyester, extrusion, extruder, 3D printing, 3D printer*

## Вступ

Полімери - найпопулярніші матеріали у виробництві тари, упаковки, скотчу, пакувальної плівки, одягу, взуття та інших виробів. Широке застосування пластику створило проблему його накопичення, впоратися з якою можна лише налагодивши вторинну переробку, яка є основним, скоріше навіть єдиним, способом вирішення проблеми забруднення навколишнього середовища.

Сьогодні ця глобальна проблема може стати значним джерелом доходу та справжнім порятунком для всього живого. Важливо розуміти, що якщо не налагодити своєчасний процес збирання, сортування та переробки пластикових відходів, уже дуже скоро вони вийдуть далеко за межі сміттєвих полігонів.

Накопичення полімерних відходів - основний негативний вплив людини на довкілля. Прагнучи зробити сучасне життя простим і комфортним, про шкоду для природи люди замислюються в останню чергу. Проблема накопичення полімерних відходів сьогодні є особливо гострою через їх згубний вплив на довкілля та його мешканців (у тому числі й саму людину).

Без вирішення проблеми рециклінгу полімерних матеріалів неможливо вирішити екологічні проблеми будь-якої країни, більше того, інші способи утилізації таких відходів можуть лише погіршити ситуацію. Спалювання пластику в примітивних низькотемпературних установках і просто на звалищах призводить до виділення вкрай небезпечних для здоров'я речовин, насамперед діоксинів. Сучасні сміттєспалювальні заводи, що використовують піроліз, частково вирішують цю проблему. Кардинальним, і до того ж економічно вигідним її вирішенням є лише рециклінг.

Більше того, в результаті переробки різними методами утворюються додаткові продукти для інших галузей промисловості, природа забруднюється значно менше, а використання вторинних відходів дозволяє істотно скоротити використання первинної невідновлюваної сировини - нафти і газу, знизити споживання електроенергії і зменшити викиди вуглекислого газу. Таким чином, вторинна переробка полімерних матеріалів вносить свій внесок у протидію глобальному потеплінню.

Згідно зі статистичними даними, використання вторинної сировини у світі неухильно зростає. Це не дивно – запаси вторинної сировини за деякими показниками вже перевищують кількість наявних первинних матеріалів. Тому вчені всіх країн докладають значних зусиль до створення, розвитку та вдосконалення технологій переробки різних видів відходів.

Метою роботи є розробка технології переробки використаних виробів та відходів швейної промисловості у витратні матеріали для 3D-друку [1-5].

### Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом досліджень є процеси, що протікають під час подрібнення і екструзії подрібнених полімерних відходів швейної промисловості для виготовлення філаменту для 3D-друку. Теоретичні дослідження базуються на основних положеннях технології виробництв полімерних матеріалів.

### Постановка завдання

Враховуючи актуальність питання створення нових технологій швидкого виробництва продукції, завданням досліджень є розробка вузлів та деталей обладнання для виготовлення готових виробів з подрібнених відходів швейної промисловості.

### Результати та їх обговорення

Пластик – матеріал, який легко піддається переробці і може використовуватися в другому циклі без втрати основних властивостей. З вторинного пластику виробляють безліч предметів, необхідних у повсякденному житті. З них виготовляють: будівельні матеріали (черепицю, тротуарну плитку тощо); сумки, валізи та рюкзаки, які нічим не поступаються виробам із первинної сировини; спортивний інвентар, велосипеди тощо; пакети, пакувальні матеріали; одяг (костюми, куртки, футболки), взуття (спортивні кросівки); меблі (столи, стільці, лавки); дорожні покриття тощо.

Легка промисловість використовує для виготовлення одягу і предметів побуту різноманітні типи сировини. Лідируючі позиції у світі серед синтетичних полімерів займає поліестер (Polyester) та нейлон (Nylon).

Поліестер - волокна, які з'явилися завдяки активній еволюції нафтопереробної галузі. Це різновид синтетичного матеріалу. Ззовні він нагадує тонку вовну, але за споживчими властивостями є ближчим до бавовни. Даний матеріал виготовляється з розплаву поліетилентерефталату – міцного, зносостійкого термопластика, що є гарним діелектриком.

Одним із різновидів поліестерного волокна є лавсан.

Поліестер є найпоширенішим та сучасним матеріалом, який використовується для створення синтетичних тканин різних видів. Цей матеріал почали активно використовувати в легкій промисловості лише на початку 60-х років XX століття. Його використовують при пошитті повсякденного одягу та аксесуарів: штанів, спідниць, суконь, плащів, пальто, курток, спортивних костюмів, футболок, шортів, нашивок, краваток тощо. З поліестеру виготовляють домашній текстиль, в тому числі постільну білизну, фіранки, скатертини. Тканина підходить і для перетягування меблів. Це економічно вигідно, так як поліестер коштує недорого – дешевше, ніж інші матеріали для оббивання.

Багато предметів туристичного та рибальського спорядження, починаючи з захисних чохлів і

закінчуючи лежаками, виготовляються саме з цього матеріалу. З нього виробляють тенти, намети та спальні мішки.

З цієї ж тканини, тільки іншої щільності, виготовляються медичні плівки і укривні матеріали для садівників. У харчовій промисловості застосовується як матеріал для фільтрування розчинів. Затребуваний даний синтетичний матеріал у взуттєвій промисловості, а також при виробництві спецодягу.

Нейлон – це тривіальна назва синтетичного волокна, яке виготовляють із поліаміду (ПА). Це загальна назва сімейства синтетичних полімерів, що складаються з поліаміду, які являють собою ланки, що повторюються, пов'язані амідними зв'язками. Представляє собою термопластичний матеріал, який зазвичай виготовляється з нафти. Його можна переробляти у розплавленому вигляді у волокна, плівки або формувати у формі необхідні вироби. Нейлонові полімери можна змішувати з різними добавками для отримання матеріалів із заданими властивостями.

Існує багато типів нейлонових полімерів серед яких найбільш поширеними є: нейлон 1.6; нейлон 4.6; нейлон 510; нейлон 6; нейлон 6.6 та інші.

Нейлон 1.6. Має високу вологопоглинаючу здатність через значну щільність амідних залишків у полімері. Нейлон 1.6 зазвичай не використовується для виготовлення тканин.

Нейлон 4.6. Має більш високу температуру плавлення в порівнянні з іншими типами нейлону. В основному його використовують як компоненти двигунів (трансмисії, гальма, системи повітряного охолодження). Його перевагами є більш висока температура теплової деформації, більш висока кристалічність в порівнянні з деякими типами нейлону.

Нейлон 510. Він має чудові властивості, але його виробництво є коштовнішим. Виробництво тканин із цього полімеру не здійснюється. Використовується в більшості випадків в машинобудівній промисловості та в виготовленні різноманітних дослідних зразків. До його переваг можна віднести міцність і довговічність. До недоліків відноситься висока вартість виробництва.

Нейлон 6. Волокна нейлону 6 міцні, мають високу міцність на розтяг, еластичність і блиск. Його температура плавлення становить 215 °С. Застосовується у багатьох галузях промисловості, зокрема: автомобільній, електронній, електротехнічній, авіабудуванні, швейній промисловості тощо.

Переваги нейлону 6 полягають у тому, що його волокна не зминаються і мають високу стійкість до стирання та впливу хімічних речовин, таким як кислоти та луги. Недоліком є те, що його відносно важко переробляти через виключно низьку в'язкість розплаву.

Нейлон 6.6. Він є більш кристалічною версією нейлону 6. Його також називають поліамідом 66 або ПА 66. Він має поліпшені механічні властивості завдяки його більш впорядкованій молекулярній структурі. Нейлон 6.6 для механічної обробки має покращену термостійкість і нижчі показники водопоглинання порівняно зі стандартним нейлоном 6. Застосування нейлону 6.6 включає зносостійкі накладки, напрямні колеса та підшипники ковзання. Його переваги полягають у тому, що межа текучості вище, ніж у нейлону 6 і нейлону 610. Він має високу міцність, ударну в'язкість, жорсткість і низький коефіцієнт тертя в широкому діапазоні температур. Крім того, він стійкий до впливу мастил, хімічних реагентів та розчинників. Недоліками нейлону 6.6 є його висока гігроскопічність, знижена в'язкість в сухому середовищі, складність контролю процесу формування.

Нейлон 66 (анід), зазвичай, випускається у вигляді моноволокна або комплексних ниток. Використовується при виготовленні панчішно-шкарпеткових виробів, штучного хутра тощо. Щільність нейлону даного типу становить 1.14. Це найпоширеніший поліамід, об'єм якого на ринку становить понад 40 %.

Найчастіше для лиття пластмас під тиском використовується нейлон типу PA6 і PA66. Нейлон має гарну міцність, жорсткість, термостійкість, зносостійкість і змашувальні властивості, а також хімічну стійкість до вуглеводнів.

Крім того, нейлон має відносно низьку вартість порівняно з характеристиками технічних полімерів, простий в обробці і може бути армований скловолокном або вуглецевим волокном для підвищення механічних і термічних властивостей.

Через широкий спектр властивостей даний матеріал знайшов використання в різних галузях промисловості. В швейній промисловості, завдяки різній щільності, жорсткості та призначенню використовуються різні марки нейлону.

Розглянемо основні види поліамідних тканин, що використовуються:

- нейлон 7 – властивості тканини можна порівняти з попереднім різновидом, а саме нейлоном 66, проте цей вид більш еластичний та міцний. Відомий як енант;
- капрон – еластичний різновид, що знайшов широке застосування у виробництві одягу та аксесуарів. Температура плавлення - 215 °С;
- ундекан або рильсан – еластичне поліамідне волокно, що широко використовується при виготовленні плащів;
- нейлон 4 або 40d – відомий як ріпстоп. Комбінована тканина з армованої нитки із нейлоном. Має високу міцність на розрив;
- балістичний нейлон – різновид ріпстопу. Виготовляється з 1050D або 840D ниток. Використовується при виготовленні військового одягу та бронежилетів. Балістик захищає військових від осколкових поранень та вибухової хвилі. На сьогодні все більше замінюється кевларом;
- нейлон 600D – тонкий і легкий різновид. Використовується переважно для пошиття рюкзаків;

- нейлон PA12 – покращений різновид аніду, відомий як нейлон водонепроникний. Нейтральний до дії розчинників та солей. Міцний та зносостійкий, але має меншу температуру плавлення – 178 °С;

- шовний нейлон - матеріал, що використовується в хірургії. З нього виготовляють нитки, якими скріплюють рани та постопераційні шви;

- спандекс – повністю синтетичний матеріал, за основу якого береться нейлон, ацетат та інші полімери. Цей легкий, еластичний матеріал використовується у багатьох сферах, починаючи від оббивки меблів та закінчуючи медичними рукавичками;

- велсофт – міцна тканина, виготовлена із поліаміду. Для синтетичних виробів нового покоління було розроблено та протестовано нову технологію виробництва надтонких волокон з максимальним діаметром 0,06 міліметрів.

Широка гамма готових виробів із поліестеру та нейлону піднімає питання їх подальшої утилізації після періоду експлуатації чи переробки у готові вироби.

Поліестерні волокна не піддаються біологічному розкладанню. Наприклад, в одязі їх кількість складає близько 16%. Однією з переваг таких волокон є те, що їх можна переробити в первинні (нові) волокна.

Більшість виробів легкої промисловості досі викидають та спалюють на сміттєспалювальних заводах, або вони потрапляють на сміттєзвалища. Серед них є вироби, які вміщують поліестерні (лавсанові) та нейлонові волокна.

Переробка також стикається з низкою проблем, а це означає, що в усьому світі лише менше одного відсотка всіх матеріалів, які використовуються в одязі, переробляються знову в одяг. Це відображає відсутність технологій їх подальшої переробки. Крім того, існуючі технології, які дозволяють переробляти одяг на первинні волокна, все ще недосконалі. Тому актуальною задачею є створення технології переробки виробів, що вміщують поліестерні або нейлонові волокна у нові готові вироби.

Однією із переваг є те, що при нагріванні поліестер та нейлон плавляться, і якщо їх пропускати через дрібні отвори, то виходять тоненькі цівки. При охолодженні вони застигають і утворюють нитки.

На сьогодні існує п'ять способів переробки полімерних матеріалів.

Піроліз – вплив на речовину температурою з киснем або без нього.

Гідроліз – спосіб переробки за допомогою екстремально високих температур та тиску. На виході виходить якісніша сировина, ніж при використанні піролізу.

Гліколіз – спосіб, в якому застосовуються дуже високі температури та тиск з використанням етиленгліколю та каталізатора, що допомагає отримати чистий та якісний продукт.

Метаноліз – переробка пластикових відходів за допомогою метанолу. Цей спосіб найпоширеніший.

Механічний рециклінг – це метод, суть якого полягає в механічному подрібненні пластикових відходів з метою подальшої термічної обробки.

Всі ці способи мають загальну мету – отримання якісної сировини, яку можна було б використовувати у виробництві. Однією з затребуваних форм сировини є пластикова гранула.

Вторинна гранула – це результат переробки первинного пластику, тобто пластикових відходів. Сьогодні пластикова гранула – це основний матеріал для виробництва різних пластикових виробів. Технологія гранулювання пластику досить проста і не надто затратна, тому багато компаній спеціалізуються на переробці пластику в гранули.

Переробка пластику в гранули відбувається поетапно:

1. Сортування. Відходи поділяються за виглядом та кольором – цей етап, як правило, виконується вручну.

2. Дроблення. Подрібнення відсортованих відходів у спеціальному дробильному устаткуванні.

3. Очищення та промивання. Отриману подрібнену сировину ретельно промивають та очищують від домішок.

4. Сушіння. Отримана на попередніх етапах суміш добре просушується.

5. Нагрівання. Суху масу нагрівають до відповідної температури. Температура нагрівання залежить від виду полімеру.

6. Формування. Маса витискається через спеціальні ниткоподібні отвори методом екструзії.

7. Охолодження. Після витискання маса відразу поміщається у холодну воду.

8. Формування гранул. Отримані після охолодження нитки нарізуються на гранули.

Альтернативний спосіб – це метод гарячого різання, в якому відразу після витискання масу нарізають на гранули, минаючи етап охолодження.

9. Виготовлення готового виробу.

Необхідність переробки пластикових відходів викликана не лише великою кількістю сміття, а й потребою багатьох сучасних підприємств у вторинній сировині. Таким чином, бізнес, побудований на переробці пластикових відходів та виготовленні вторинної сировини, сьогодні є одним із найперспективніших.

Завдяки своїм фізичним та хімічним властивостям, пластик, як вже зазначалося вище, може проходити нескінченну кількість циклів виробництва та переробки. Розробка нових технологій та обладнання для переробки допоможуть вирішити проблему надлишків пластикових відходів, а в перспективі, усунути необхідність виробництва нового пластику.

Пропонується нова технологія переробки полімерних відходів у готові вироби методом 3D-друку, що включає в себе:

1. Сортування.
2. Дроблення.
3. Очищення та промивання.
4. Сушіння.
5. Нагрівання подрібненого матеріалу в екструдері 3D-принтера та екструзія розплавленого полімеру.
6. Формування готового виробу. Маса витискається через сопло екструдера та пошарово формується готовий виріб.

Деякі подрібнені матеріали можуть не потребувати виконання операцій 3 і 4. Таким чином скорочується кількість операцій для отримання готового виробу.

З метою подальших експериментальних досліджень було підібрано текстильні матеріали з поліестеру та нейлону.

Розробка ефективного подрібнюючого пристрою для переробки відходів легкої промисловості і надалі залишається актуальною. Існують багато пристроїв для переробки вторинних відходів, але всі вони мають свої недоліки, що не дозволяє зробити процес подрібнення простим та ефективним. Основною проблемою проєктування подрібнюючих пристроїв є недосконалість розроблених методик розрахунку конструкцій обладнання, а також технологічного процесу.

Для подрібнення полімерних відходів легкої промисловості використано експериментальну установку, яка дозволяє реалізувати процес подрібнення текстильних матеріалів з можливістю врахування всіх факторів, які впливають на даний процес. Конструкція установки допускає змінювати, в певних межах, технологічні та конструктивні параметри, що дозволяє досліджувати їх вплив на процес подрібнення і здійснити необхідні вимірювання. Але основним є те, що вона дозволяє регулювати величину волокна, яке буде отримане після процесу подрібнення. Це питання є актуальним при використанні в якості вихідної величини для 3D-друку.

В якості зразків при проведенні експериментальних досліджень процесу подрібнення волокнистих полімерних відходів використовувалися відходи із текстильних матеріалів, які утворилися методом розкרוю деталей виробів із настилу. Для подрібнення було використано зразки таких матеріалів як лавсан та нейлон.

Використовуючи експериментальну установку, що представлена на рис.4, було проведено подрібнення вибраних матеріалів. Отримані зразки представлено на рис.1.



а



б

Рис. 1. Зразки подрібнених полімерів: а - поліестер (лавсан); б - нейлон

З метою проведення пошукового експерименту для підтвердження того, що подрібнені відходи полімерних матеріалів піддаються повторному розплавленню було використано машину для екструзії, що представлена на рис.2.

Екструзійна машина складається з наступних частин: корпусу із системою нагріву (1) до необхідної температури плавлення полімеру; вузла завантаження (2) через який попередньо підготовлений подрібнений полімер поступає в порожнину корпусу; порожнини корпусу із шнеком для переміщення сировини від вузла завантаження до формуючої насадки; приводу шнека; екструзійної головки (рис.3); системи охолодження і намотування філаменту (рис.4); системи контролю і керування, яка підтримує необхідний технологічний режим.



Рис. 2. Екструзійна машина: 1 - корпус з системою нагріву; 2 - блок завантаження



Рис. 3. Екструзійна головка



Рису. 4. Системи охолодження та намотування полімерної нитки

Було розроблено та виготовлено конструкцію шнеку для подачі подрібненого полімеру у вигляді волокон, або малих кусків текстильного матеріалу.

Система контролю і керування включає в себе: кнопку вмикання живлення екструдера; кнопку подачі живлення на нагрівач; кнопку запуску мотор-редуктора шнека для подачі гранул із бункера в камеру плавлення; кнопку вмикання системи подачі та намотування полімерної нитки. В систему керування пристрою також входить термоконтролер, що регулює температуру сопла та зони плавлення. Система дозволяє регулювати частоту обертання шнека, швидкість підтягування та намотування нитки.

Принцип роботи екструдера полягає в наступному. Після нагріву до потрібної температури екструзії вибраного подрібненого полімерного матеріалу здійснюється витримка 5-10 хвилин з метою прогрівання матеріального циліндра зсередини. Після цього вмикається мотор-редуктор. Полімерний матеріал у вигляді подрібнених відходів попередньо висушується для видалення вологи в сушильній шафі, а потім засипається у бункер екструдера. Пластик з наповненого бункера захоплюється шнеком і надходить в робочу зону корпусу екструдера, де під дією тиску, тертя і тепла, що надходить ззовні нагрівається і плавиться до стану необхідного за умовами технологічного процесу. Розплавлений полімер шнеком подається в бік фільтри. За рахунок форми шнека у циліндрі в зоні виходу розплавленого полімеру створюється тиск, що спонукає матеріал «набухати» після виходу із екструдера. Вихідний отвір екструзійної головки регулює діаметр полімерної нитки.

Витиснена нитка подається через примусову систему охолодження і рівномірно намотується на

котушку (рис.4).

Серед інших параметрів, що характеризують подрібнені полімерні матеріали, а саме лавсан і нейлон є їх температура плавлення. Температура плавлення - це температура, при якій матеріал подається з фільтри екструзійної машини. Ця температура є індивідуальною для кожного матеріалу. При екструзії необхідно як можна точніше притримуватися відповідного значення, щоб отримати вироби з очікуваними фізичними, механічними і температурними властивостями. Для цього в литевій машині чи 3D-принтері повинна бути правильно задана температура плавлення.

З метою визначення оптимальної температури плавлення полімерів, що розглядаються було проведено експериментальні дослідження.

Невідповідність температури в екструдері оптимальній температурі плавлення полімеру приводило до виникнення різноманітних дефектів: недоплавлення; перегріву; забивання фільтри тощо (рис.5).



Рис. 5. Дефекти нагріву полімерів

В результаті досліджень було визначено оптимальні температури плавлення для: поліестеру - 235 °С; для нейлону – 245 °С.

Приклад якісного видавлювання розплавленого нейлону через фільтру екструзійної машини



Рис. 6. Видавлювання розплавленого нейлону через фільтру екструзійної машини

### Висновки

Проведені експериментальні дослідження підтвердили можливість повторної переробки подрібнених відходів полімерних матеріалів у готові вироби з використанням 3D-принтерів, що використовують в якості вихідної сировини гранули або подрібнені відходи полімерів [1, 5].

З цією метою необхідно розробити конструкцію 3D-принтера, провести процес друку на ньому готових виробів та дослідити їх властивості.

**Література**

1. Зозуля П.Ф., Поліщук О.С., Поліщук А.О. Перспективи застосування 3D-друку в легкій промисловості. Вісник Хмельницького національного університету. 2017. № 4. – С. 102-104, (Україна).
2. Зозуля П.Ф., Поліщук О.С., Неймак В.С., Поліщук А.О. Застосування технології 3D-друку у взуттєвій промисловості. Наукові нотатки. Луцький національний університет, 2019. – Випуск №67. – С.48-52, (Україна).
3. O. Polishchuk, M. Bonek, M. Skyba, A. Polishchuk, S. Lisevich Prospects of using composite filaments with high metal content for manufacture of industrial machine building products method of 3d printing. Monograph: editer by Musial J., Polishchuk O., Skyba M. Bydgoszcz, Poland, 2021. – P.390-396, (in Poland).
4. Zozulia P., Pyshcheniuk N., Skyba M., Polishchuk O., Malec M. General classification of 3D printing. Analytical study of a device for loading of pet bottles in rotary crushers. Actual problem of modern science. Monograph: editer by Musial J., Polishchuk O., Sorokatyi R. Bydgoszcz, Poland, - 2017. - P.413-421, (in Poland)
5. Поліщук О.С., Зозуля П.Ф., Поліщук А.О. Узагальнена класифікація філаментів для 3D-друку, Вісник Хмельницького національного університету. 2017. № 6. – С. 51-59,(Україна).

**References**

1. Zozulya P.F., Polishchuk O.S., Polishchuk A.O. Prospects for the use of 3D printing in light industry. Bulletin of Khmelnytskyi National University, 2017. № 4. – P. 102-104, (in Ukraine).
2. Zozulya P.F., Polishchuk O.S., Nejmak V.S., Polishchuk A.O. Application of 3D printing technology in the footwear industry. Scientific notes. Lutsk National University, 2019. – Issue №67. – P.48-52, (in Ukraine).
3. O. Polishchuk, M. Bonek, M. Skyba, A. Polishchuk, S. Lisevich Prospects of using composite filaments with high metal content for manufacture of industrial machine building products method of 3d printing. Monograph: editer by Musial J., Polishchuk O., Skyba M. Bydgoszcz, Poland, 2021. – P.390-396, (in Poland).
4. Zozulia P., Pyshcheniuk N., Skyba M., Polishchuk O., Malec M. General classification of 3D printing. Analytical study of a device for loading of pet bottles in rotary crushers. Actual problem of modern science. Monograph: editer by Musial J., Polishchuk O., Sorokatyi R. Bydgoszcz, Poland, - 2017. - P.413-421, (in Poland)
5. Polishchuk O.S., Zozulya P.F., Polishchuk A.O. Generalized classification of filaments for 3D printing. Bulletin of Khmelnytskyi National University, 2017. № 6. – P. 51-59.