

ПОЛІЩУК АНДРІЙ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7887-7169>e-mail: andrepol215@gmail.com

СКИБА МИКОЛА

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0217-9633>e-mail: mykolaskybaxnu@gmail.com

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗРАЗКІВ, ВИГОТОВЛЕНИХ З ПОДРІБНЕНИХ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ НА 3D-ПРИНТЕРІ ЗІ ШНЕКОВИМ ЕКСТРУДЕРОМ

В статті проведено експериментальне дослідження зразків, виготовлених із подрібнених полімерних відходів на 3D-принтері зі шнековим екструдером. Наведено загальні відомості про експериментальне дослідження. Здійснено аналіз літературних джерел по дослідженню механічних властивостей виробів, виготовлених за технологією FDM на 3D-принтерах. Для виготовлення експериментальних дослідних зразків вибрано два 3D-принтери, один з яких друкує філаментом, другий гранулами чи подрібненими полімерними відходами. Підібрано устаткування для визначення точності надрукованих зразків. Удосконалено вимірювальну частину розривної машини для зняття діаграм розтягу полімерних зразків. Встановлено у ній тензометричний датчик для вимірювання сили та оптичний еncoder для вимірювання переміщення. Розроблено цифрову електронну систему для зняття даних із датчиків на базі мікроконтролера Arduino Uno. Створено програмне забезпечення для обробки експериментальних даних. Наведено загальний вигляд експериментальної установки. Запропоновано використати одновісний розтяг для оцінки механічних характеристик надрукованих на 3D-принтері тестових зразків. Описано діючі міжнародні стандарти для випробовування на розтяг пластмас. Для визначення механічних характеристик на розтяг виготовлено зразки у формі лопатки з полімерних матеріалів ABS і TPU. Встановлено параметри друку тестових зразків, виготовлених з даних матеріалів. З використанням розробленої установки отримано діаграми руйнувань зразків (лопаток), виготовлених з подрібнених полімерних відходів та філаменту ABS та TPU пластиків з різною величиною внутрішнього заповнення. У вигляді таблиць представлено значення механічних характеристик зразків, виготовлених методом 3D-друку з полімерів ABS та TPU з різним внутрішнім заповнення отримані при випробовуванні на одновісний розтяг. Наведено фото місць розриву лопаток з ABS пластику, зроблені з використанням цифрової камери. По них здійснено аналіз структури зразків. Виготовлено з використанням двох 3D-принтерів дослідні тестові зразки для визначення точності 3D-друку. Проведено вимірювання в різних площинах тестового кубика за допомогою цифрового електронного штангенциркуля. Здійснено порівняння отриманих результатів із створеною моделлю. Описано шляхи поліпшення точності друку.

Ключові слова: ABS пластик, TPU пластик, 3D-друк, 3D-принтер, шнековий екструдер, розривна машина, дослідний зразок, зусилля розриву, видовження зразка

POLISHCHUK ANDRII, SKYBA MYKOLA

Khmelnyskyi National University

EXPERIMENTAL STUDY OF SAMPLES MANUFACTURED FROM CRUSHED POLYMER WASTE ON A 3D PRINTER WITH A SCREW EXTRUDER

The article conducts an experimental study of samples made from crushed polymer waste on a 3D printer with a screw extruder. General information about the experimental study is given. An analysis of literary sources on the study of mechanical properties of products manufactured by FDM technology on 3D printers was carried out. Two 3D printers were chosen for the production of experimental prototypes, one of which prints with filament, the other with granules or crushed polymer waste. The equipment for determining the accuracy of printed samples has been selected. The measuring part of the tearing machine for taking tensile diagrams of polymer samples has been improved. A strain gauge for force measurement and an optical encoder for displacement measurement are installed in it. A digital electronic system for data collection from sensors based on the Arduino Uno microcontroller was developed. Software for experimental data processing was created. The general view of the experimental setup is given. It is proposed to use uniaxial tension to evaluate the mechanical characteristics of the test samples printed on a 3D printer. Current international standards for tensile testing of plastics are described. To determine the mechanical tensile characteristics, samples in the shape of a blade were made from polymer materials ABS and TPU. The parameters for printing test samples made from these materials are set. With the use of the developed installation, the failure diagrams of samples (blades) made of crushed polymer waste and filament of ABS and TPU plastics with different amounts of internal filling were obtained. In the form of tables, the values of the mechanical characteristics of the samples produced by the 3D printing method from ABS and TPU polymers with different internal filling obtained during the uniaxial tensile test are presented. A photo of the places of breakage of ABS plastic blades, taken using a digital camera, is given. An analysis of the structure of the samples was carried out on them. Experimental test samples were made using two 3D printers to determine the accuracy of 3D printing. Measurements were made in different planes of the test cube using a digital electronic caliper. The obtained results were compared with the created model. Ways to improve print accuracy are described.

Keywords: ABS plastic, TPU plastic, 3D printing, 3D printer, screw extruder, tensile testing machine, test sample, tensile strength, elongation of the sample.

Вступ

Наукове дослідження являє собою вид інтелектуальної діяльності, метою якого є отримання нових знань. Цей процес характеризується цілеспрямованим дослідженням, включаючи комплекс логічних методів

і практичних експериментів, здійснюваних над об'єктом вивчення. Головна мета таких досліджень полягає у виявленні властивостей досліджуваного об'єкта та встановленні закономірностей, що визначають його поведінку [1, 2].

Найбільш важливою складовою частиною наукових досліджень є експерименти [3]. Це один з основних способів отримання первинної інформації, перевірки теоретичних положень і формулювання нових наукових знань. Експериментальна робота дозволяє науковцям моделювати процеси та явища, вивчати їх в контрольованих умовах, а також аналізувати результати впливу різних чинників на об'єкт дослідження.

Експериментальні дослідження - це практичні заходи, які включають збір, реєстрацію і аналіз даних, отриманих в результаті виконання контрольованих експериментів. Головна мета таких досліджень полягає у вивченні властивостей об'єктів чи процесів, перевірки гіпотез та теорій, а також отриманні нових знань, які можуть бути використані для розвитку нових технологій або покращення існуючих.

Швидкий прогрес в галузі машинобудування часто випереджає розвиток науково-теоретичної основи, внаслідок чого багато машин розробляються без повноцінних розрахунків, а іноді навіть без них. Це особливо актуально при проектуванні механічних, електромеханічних, електрогідравлічних, пневматичних та електричних систем, де теоретичні розрахунки можуть бути особливо складними. У таких ситуаціях експериментальні методи виявляються надзвичайно корисними, оскільки вони дозволяють отримати необхідні дані для теоретичного аналізу або практичного вирішення проблеми [4].

У сфері виробництва і переробки полімерів, експерименти зі шнековими екструдерами 3D-принтерів мають особливе значення, адже дозволяють оптимізувати технологічні процеси, підвищити ефективність використання матеріалів та знизити екологічний вплив виробництва. Вони також важливі для розвитку та вдосконалення методів рециклінгу, які спрямовані на боротьбу зі зростаючими обсягами полімерних відходів. З огляду на зростаючі вимоги до сталості та екологічності виробничих процесів, значення експериментальних досліджень стає ще більш актуальним. Вони надають можливість визначити оптимальні умови для обробки та використання вторинної сировини, а також сприяють пошуку нових матеріалів та технологій для 3D друку.

Актуальність проведення експериментальних досліджень зразків, виготовлених з подрібнених полімерних відходів на 3D принтері зі шнековим екструдером, обумовлена пошуком ефективних шляхів рециклінгу та вторинного використання полімерних матеріалів. Завдяки таким дослідженням можна визначити якість виготовлення зразків, їх механічні, фізичні та естетичні властивості. Це дозволяє розробити методики оптимізації параметрів друку, а також удосконалити технологічні процеси для забезпечення кращих характеристик кінцевих продуктів.

Використання подрібнених полімерних відходів для виготовлення нових виробів не лише зменшує обсяги відходів, які потребують утилізації, але й сприяє створенню економічно вигідних та екологічно чистих матеріалів. Експериментальні дослідження таких зразків мають велике значення для промисловості та екології, оскільки вони допомагають встановити стандарти якості для подальшого масового виробництва і сприяють розширенню можливостей для сталого розвитку.

Аналіз літературних джерел показав, що механічні властивості виробів, виготовлених за технологією FDM на 3D-принтерах, особливо з використанням шнекового екструдера, визначені недостатньо. В більшості робіт досліджуються зразки виготовлені з пластику PLA, рідше ABS, які найчастіше використовуються для друку [5, 6, 7]. В роботі [8] проводяться механічні дослідження зразків виготовлених методом 3D-друку з філаменту, отриманого з відходів поліетилентерефталату. В науковій праці [9] досліджується вплив на міцнісні властивості різних матеріалів (ABS, PLA і PETG) різних ступенів наповнення друку (10, 30 і 60%) і типів наповнення (лінії, стільники і сітка), виготовлених об'єктів.

Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом досліджень є процеси, що протікають під час виготовлення полімерних зразків з використанням 3D-принтерів з екструдерами, що використовують гранули, подрібнені відходи в якості вихідної сировини. При вирішенні поставлених задач використано метод системного аналізу. Експериментальні дослідження базуються на основних положеннях наукового методу досліджень, включаючи детальне вивчення властивостей використовуваних матеріалів, процесів їх обробки та впливу різних параметрів на якість кінцевих виробів, що дозволяє оптимізувати технологічний процес і підвищити ефективність використання 3D-друку.

Постановка завдання

Завданням даного наукового дослідження є проведення експериментального аналізу фізико-механічних властивостей зразків, виготовлених із подрібнених полімерних відходів за допомогою 3D-принтера зі шнековим екструдером. Основна мета полягає у визначенні можливостей вторинного використання полімерних відходів у виробництві функціональних деталей та вивченні впливу різних технологічних параметрів на якість друкованих виробів.

Результати та їх обговорення

Для виготовлення експериментальних зразків із філаменту та подрібнених часток полімеру методом 3D-друку та подальшого визначення їх механічних характеристик, було обрано два 3D-принтера. Перший – це принтер Anycubic Mega S з технологією друку FDM китайської компанії Anycubic [10], другий – розроблений на базі нього 3D-принтер зі шнековим екструдером, що друкує гранулами або подрібненими полімерними відходами [11]. Загальний вигляд даних пристроїв наведено на рис.1 та 2.

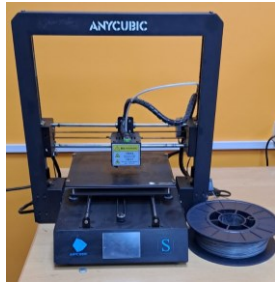


Рис.1. Загальний вигляд 3D принтера Anycubic Mega S

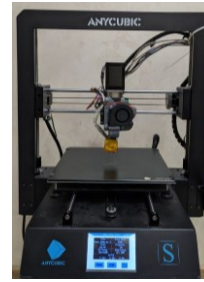


Рис.2. Загальний вигляд 3D-принтер Anycubic Mega S із встановленим шнековим екструдером

Основні технічні характеристики базової моделі 3D-принтера Anycubic Mega S приведені в табл.1.

Табл. 1

Технічні характеристики 3D-принтера Anycubic Mega S

№ п/п	Параметр	Величина
1	Технологія друку	FDM
2	Кількість сопел	1
3	Область друку, мм	210x210x205
4	Швидкість друку, мм/с	20-100
5	Діаметр сопла (мм)	0,4
6	Товщина шару, мкм	50-300
7	Точність позионування, мм:	X/Y 0,0125; Z 0,002
8	Діаметр пластикової нитки	1,75
9	Максимальна температура друку, °C	260

Більш детально технічні характеристики 3D-принтера Anycubic Mega S наведено в роботі [11].

Для точності досліджень в екструдерах 3D-принтерів було встановлено однакові сопла та програмне забезпечення.

Для визначення геометрії тестових зразків використано цифровий електронний штангенциркуль, що призначений для вимірювання параметрів поверхонь всередині та ззовні, а також глибин отворів (рис.3) [12].

Даний вимірювальний прилад має діапазон вимірювання від 0 до 150 мм. Забезпечує точність вимірювання до 0,01 мм. Інструмент оснащений цифровим дисплеєм, що забезпечує зручність виведення результатів вимірювань.

Для дослідження механічних характеристик виробів, надрукованих за допомогою 3D-технології, розроблено експериментальну установку. Ця установка дає можливість визначати зусилля розтягу виробів (зразків) та їх видовження.

Установка для випробування зразків на розтяг, виготовлених з подрібнених полімерних відходів на 3D-принтері з шнековим екструдером та із філаменту на звичайному 3D-принтері, є важливою частиною експериментального дослідження. Вона дозволяє оцінити механічні властивості матеріалів та порівняти їхні характеристики.

Основними компонентами експериментальної установки є: розривна машина; силосимірювальний датчик; лінійний оптичний енкодер; електронна цифрова система; програмне забезпечення.

Розривна машина з черв'ячним редуктором - це основний компонент установки, призначений для створення контрольованого зусилля розтягу. Черв'ячний редуктор забезпечує плавність руху та точність прикладеного навантаження. Установка була розроблена на основі розривної машини PT250M-2, що призначена для дослідження текстильних матеріалів з натуральних і синтетичних волокон на розтяг [13]. У ній було замінено вимірювальну систему та удосконалено систему приводу електричного двигуна. Це дало змогу підвищити точність та зручність проведення досліджень. Кінематична схема удосконаленої машини представлена на рис.4, а її загальний вигляд – на рис.5.

В розривній машині було встановлено тензометричний датчик Tedeа 619 фірми Vishay (рис.6) [14-16]. Його максимально допустиме зусилля складає 2 тони. Використання такого датчика у розривній машині значно поліпшило точність та надійність вимірювань сил розтягу зразків. Цей датчик, завдяки своїм високоточним характеристикам, забезпечив більшу чутливість та точність відслідковування зусиль, що діють на матеріал під час випробувань, дозволяючи отримати більш детальну картину механічних властивостей зразків. Це важливо для розуміння поведінки матеріалів, особливо при дослідженні нових видів надрукованих на 3D-принтері зразків з полімерних композицій або матеріалів, отриманих з рециклінгу [17, 18].



Рис.3. Загальний вигляд цифрового електронного штангенциркуля

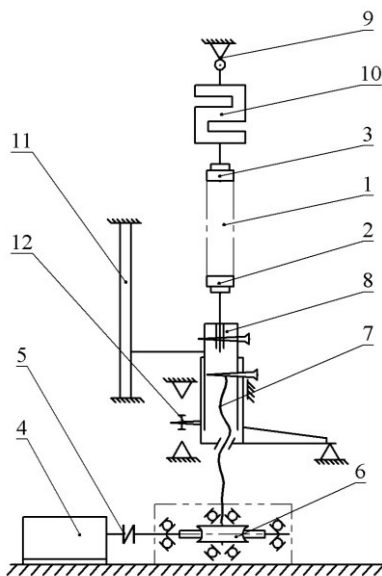


Рис.4. Кінематична схема експериментальної установки:
 1-зразок матеріалу; 2-нижній затискач; 3-верхній затискач;
 4-електродвигун; 5-муфта; 6-черв'ячний редуктор; 7-гвинт редуктора; 8-шток;
 9-шарнір; 10-силівимірювальний датчик; 11-лінійний оптичний енкодер; 12-кінцевик

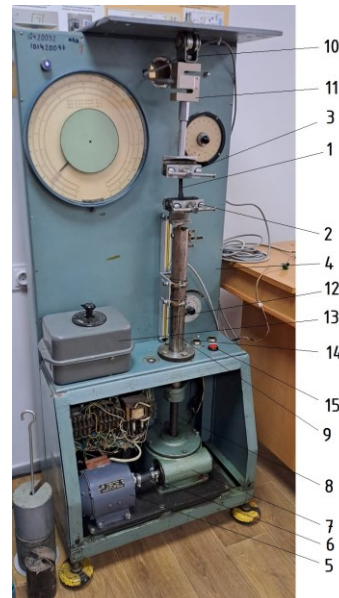


Рис.5. Загальний вигляд розривної машини: 1-зразок матеріалу; 2-нижній затискач; 3-верхній затискач; 4-опорна рама; 5-електродвигун; 6-муфта; 7- черв'ячний редуктор; 8-гвинт редуктора; 9-шток; 10-шарнір; 11-силівимірювальний датчик; 12-лінійний оптичний енкодер; 13- регулятор напруги живлення електричного двигуна; 14-кнопка включення електродвигуна; 15-кнопка зупинки машини

Використання в розривній машині оптичного лінійного енкодера (датчика лінійного переміщення) ASD (Китай) стало ключовим моментом для підвищення точності вимірювань видовження матеріалів під час випробувань (рис.7). Цей датчик, завдяки своїй високій точності (до 1мкм) та чутливості, дозволить отримати дуже точні дані про деформацію матеріалу під навантаженням, що є критичним для визначення таких механічних властивостей, як модуль пружності та межа міцності. Таким чином, використання оптичного лінійного енкодера значно поліпшить якість та надійність результатів досліджень, забезпечуючи високу точність вимірювань, що є особливо важливим при аналізі властивостей нових матеріалів та композитів, створених з використанням 3D-друку. Ще однією перевагою даного датчика є те, що він видає цифровий сигнал 5V DC TTL квадратичний [19]. Діапазон вимірювання переміщення складає 30 мм.



Рис.6. Тензометричний датчик TedeA 619 фірми Vishay



Рис.7. Оптичний лінійний енкодер ASD

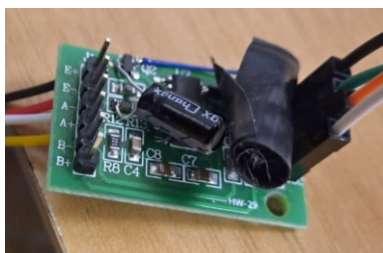


Рис.8. Аналогово-цифровий перетворювач HX711

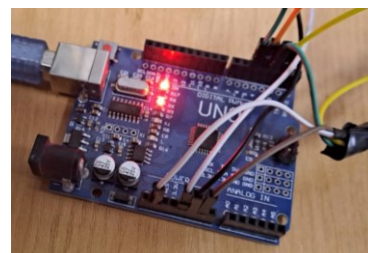


Рис.9. Мікроконтролер Arduino Uno R3

Використання оптичного лінійного енкодера в розривній машині, порівняно з енкодером кругових переміщень на валу електродвигуна, має важливу перевагу: воно забезпечує більшу точність вимірювання

лінійного переміщення [20]. Це дозволяє отримувати більш точні дані про деформацію матеріалу безпосередньо у місці навантаження, а не похідні від обертового руху двигуна.

Електронна цифрова система включає в себе аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) HX711 (рис.8) та мікроконтролер Arduino Uno R3 (рис.9) [21, 22].

Силвимірювальний датчик під'єднується до аналогового входу АЦП, а оптичний датчик – напряму до мікроконтролера. Перетворенню в АЦП піддається тільки аналоговий сигнал з тензодатчика. Далі система зчитує дані сигнали та передає їх на комп'ютер для обробки та аналізу.

Схема під'єднання датчиків до плати Arduino Uno R3 створена в програмному середовищі Fritzing представлена на рис.10 [23].

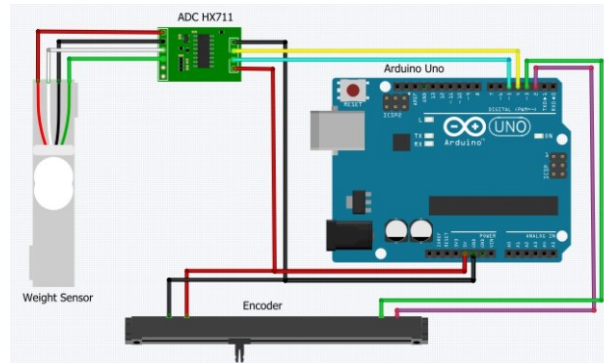


Рис.10. Схема під'єднання датчиків до плати Arduino Uno R3

Електронна цифрова система під'єднується до комп'ютера через USB-порт.

Програмне забезпечення до експериментальної установки було написано на мові програмування Java в програмному середовищі Processing (рис.11).

Java - це високорівнева, об'єктно-орієнтована мова програмування, відома своєю безпекою та високою продуктивністю [24, 25]. Її ключова особливість - здатність запускатися на будь-якому пристрої за допомогою Java Virtual Machine. Вона має велику стандартну бібліотеку класів для широкого спектра застосувань. Processing - це гнучке програмне середовище та мова програмування, зосереджена на візуалізації та інтерактивності. Воно забезпечує великий набір бібліотек та ресурсів для розширення можливостей цієї платформи [26].

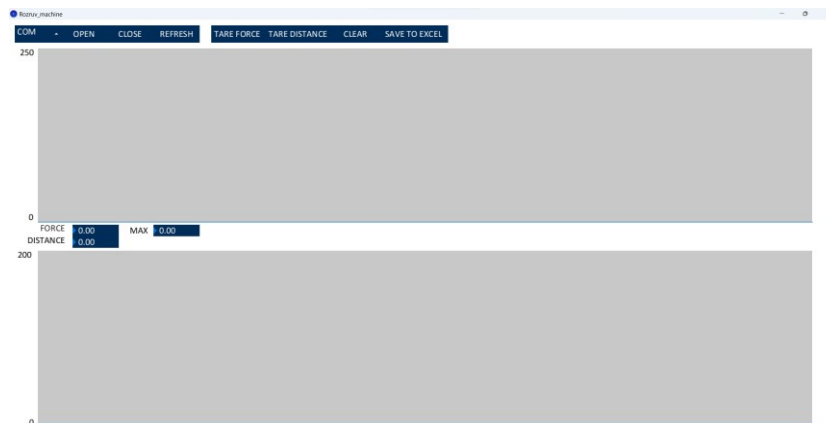


Рис.11. Інтерфейс програмного забезпечення вимірювання даних зусилля розриву та видовження надрукованих полімерних зразків

Створене програмне забезпечення для експериментальної установки дозволяє отримувати дані з датчиків в режимі реального часу. Отримані дані зберігаються в програмному середовищі MS Excel. В подальшому по них будуються графіки залежності зусилля розтягу дослідного зразка від його видовження.

Загальний вигляд розробленої експериментальної установки для дослідження зразків, надрукованих з використанням 3D-принтера, приведено на рис.12.

В розривній машині розміщено два кінцевих вимикача 12 (рис.4), які обмежують діапазон руху штока 8, задаючи максимальне переміщення на рівні 21 см. Механічну частину розривної машини (рис.5) складають опорна рама 4, електричний двигун 5, муфта 6; черв'ячний редуктор 7, гвинтовий механізм 8, 9 і пристрої для затиску дослідних зразків 2 і 3.

В електричну схему керування електродвигуном розривної машини було підключено регулятор 13 (рис.5) його напруги живлення на базі лабораторного автотрансформатора (ЛАТр). Він дає змогу, змінюючи напругу живлення двигуна, плавно регулювати швидкість переміщення штока 9.

Живлення розривної машини здійснюється від мережі однофазного змінного струму 220В. Електрообладнання машини складається із двигуна постійного струму типу ЕТОІ-4 потужністю 0,245кВт та

частотою обертання 4000 об/хв, а також апаратури керування [13].

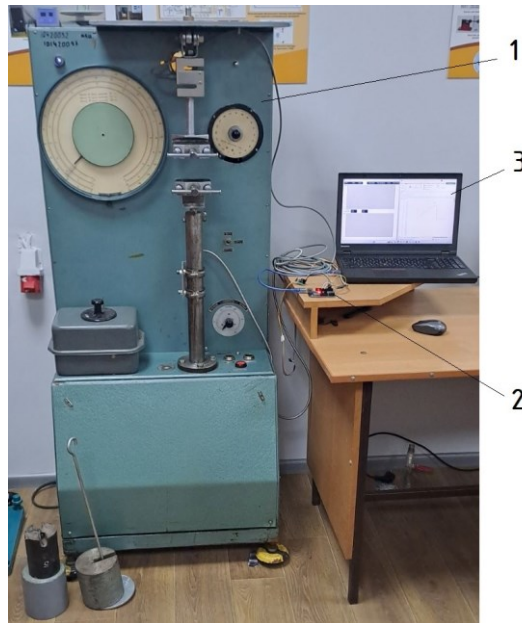


Рис.12. Загальний вигляд розробленої експериментальної установки для дослідження зразків: 1-розривна машина зі встановленими датчиками; 2-електронно-цифрова система; 3-комп'ютер зі встановленим програмним забезпеченням

Установка працює наступним чином. Між нижнім затискачем 2, що закріплений на штоці 9 та верхнім затискачем 3, який закріплений до корпусу машини через тензометричний датчик 11 та рухомий шарнір 10 (рис.5) встановлюється надрукований дослідний зразок 1. Кнопкою включення 14 розривна машина приводиться в дію. Електродвигун 5 через муфту 6 приводить в рух черв'ячний редуктор 7. В зубчастому колесі редуктора вмонтована гайка, через яку проходить гвинт 7 (рис.4) до якого прикріплено шток 8. Таким чином забезпечується лінійний рух валу. Шток 9 (рис.5) рухається донизу. В певний момент часу відбувається розрив зразка. Кнопкою виключення 15 (рис.5) машина зупиняється. Дані від тензометричного датчика та оптичного лінійного енкодера під час процесу розриву зразка поступають в електронну цифрову систему, а потім в комп'ютер. За допомогою розробленого програмного забезпечення аналізуються та обробляються. В подальшому по них будуються необхідні графіки.

Методика дослідження. Механічні випробування матеріалів є ключовим елементом у визначенні їхніх фізичних властивостей та придатності для певних застосувань. Ці випробування включають в себе ряд методів, спрямованих на оцінку таких характеристик, як: міцність, жорсткість, гнучкість, стійкість до удару та втома матеріалів [27]. Основні види механічних випробувань включають випробування на: розтяг; стиснення; згин; удар; втому та кручення. Результати цих випробувань дають інженерам цінну інформацію, яка допомагає у прийнятті рішень про вибір матеріалів для конкретних застосувань, а також для поліпшення властивостей існуючих матеріалів. Вони також критично важливі для забезпечення надійності конструкцій та виробів.

Найбільш поширений метод оцінки механічних властивостей 3D-друкованих виробів - це випробування на одновісний розтяг [28]. Цей метод є простим для експериментального виконання і дозволяє отримати важливу інформацію про характеристики матеріалу, такі як модуль пружності, межу текучості та міцність при розтязі. В нашому випадку випробування на розтяг важливі для визначення властивостей матеріалів, отриманих методом 3D-друку, оскільки вони дозволять оцінити їх міцність і стійкість до деформації під навантаженням.

Методи випробування на розтяг також стандартизовані. Існують окремі стандарти для випробувань при різних умовах, включаючи різні температури та вологість. У стандартах визначені типові форми і розміри зразків, методи вимірювання та оцінки результатів, а також вимоги до випробувального обладнання та методики проведення досліджень і обробки результатів. Однак, стандартизація методів випробувань зразків, виготовлених за допомогою 3D-друку, все ще знаходиться на етапі розробки, оскільки цей сектор технології розвивається дуже швидко, і постійно з'являються нові матеріали та методи друку.

На сьогодні національний стандарт ДСТУ стосовно методу випробування на розтяг пластмас відсутній. При виготовленні дослідних зразків та проведенні експериментальних досліджень керувалися міжнародними стандартами EN ISO 527-1:2019 та ASTM D628-14.

Стандарт EN ISO 527-1:2019 «Пластмаси - Визначення властивостей при розтягу - Частина 1: Загальні принципи» є частиною серії стандартів ISO 527, що охоплюють різні аспекти випробувань на розтяг для пластиків [29]. Він є чинним стандартом, який був введений в дію в 2019 році. Його було прийнято на заміну стандарту EN ISO 527-1:2012 [30].

Стандарт ASTM (American Society for Testing and Materials) D638-14 «Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics» є важливим міжнародним стандартом, який широко визнаний і часто

застосовується в багатьох країнах по всьому світу, особливо у промислово розвинених регіонах та тих, що тісно співпрацюють із США в галузі виробництва та наукових досліджень. Він визначає методи випробувань на розтяг для пластмас [31]. Цей стандарт встановлює процедури для вимірювання таких параметрів, як межа міцності, модуль пружності, та відносне видовження пластикових матеріалів під час розтягнення. Він описує як типи та розміри зразків для тестування, так і умови проведення випробувань, включаючи швидкість навантаження та температуру [32].

Для проведення експериментів по визначенню механічних характеристик на розтяг зразки виготовлялися у формі лопатки (рис.13) з розмірами поперечного перерізу найтоншої частини 5×10 мм (дослідження ABS пластику). Загальний розмір зразка становив 120×20×5. У зв'язку із великим видовженням полімерного матеріалу TPU при розтягу (відносне видовження при розриві для даного пластика складає 510%) та недостатнім ходом штока розривної машини (рис.5), що може цей розтяг забезпечити, робочу частину тестової лопатки було зменшено з 35 мм до 20 мм [33].

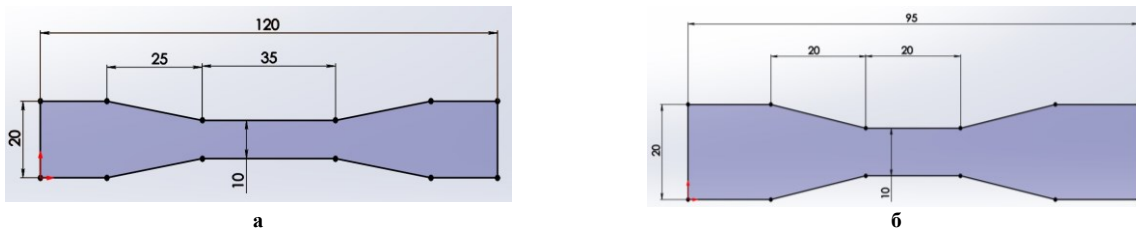


Рис.13. Розміри тестової лопатки: а-для ABS пластику; б-для TPU пластику

За допомогою програмного забезпечення SolidWorks були створені комп'ютерні 3D-моделі лопаток для експериментальних досліджень (рис.14) [34]. Пошарова розбивка (G-код) та програма 3D-друку зразка були створені за допомогою програмного забезпечення Cura (рис.15) [35].

Виготовлення зразків з філаменту та подрібнених часток ABS та TPU пластиків для проведення експериментальних досліджень, здійснювалося за технологією FDM 3D-друку на зазначених вище принтерах Anycubic Mega S та Anycubic Mega S із встановленим шнековим екструдером (рис.1 та 2).

Параметри 3D-друку для виготовлення тестових лопаток з філаментів ABS та TPU пластиків приведені в табл.2.

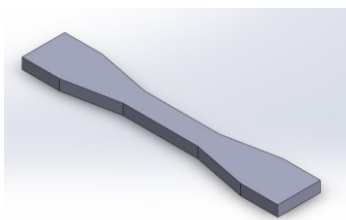


Рис.14. Комп'ютерна 3D модель лопатки з ABS пластику

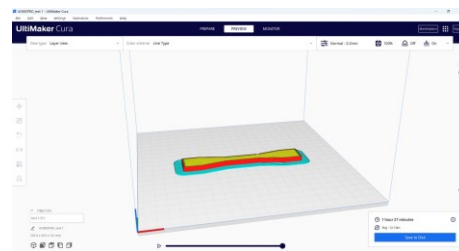


Рис.15. Пошарова розбивка лопатки з ABS пластику

Табл.2.

Параметри друку тестових зразків, виготовлених з філаментів ABS та TPU

№ п/п	Матеріал	Висота шару, мм	Товщина стінки, мм	Заповнення, %	Температура друку, °С	Температура платформи, °С
1	ABS	0,15	1,2	100	235	80
2	TPU	0,15	1,2	100	235	60

Параметри 3D-друку для виготовлення тестових лопаток з подрібнених часток ABS та TPU пластиків наведені в табл.3.

Табл.3.

Параметри друку тестових зразків, виготовлених з подрібнених відходів ABS та TPU пластиків

№ п/п	Матеріал	Висота шару, мм	Товщина стінки, мм	Заповнення, %	Температура друку, °С	Температура платформи, °С
1	ABS	0,2	2,4	100	235	80
2	TPU	0,2	2,4	100	235	60

Для друку в 3D-принтерах використовувалася розроблена конструкція сопла діаметром 0,8 мм. Більш детальна інформація про будову сопла представлена в роботі [36].

Було надруковано 48 тестових лопаток із заповненням 25%, 50%, 75% та 100%: по 12 з філаменту ABS та TPU на 3D-принтері Anycubic Mega S та по 12 з подрібнених відходів полімерів на 3D-принтері Anycubic Mega S з шнековим екструдером (вид заповнення – лінія). Також додатково було надруковано три

зразки з подрібнених гранул ABS пластику з яких виготовляються філамент. Їх степiнь заповнення складала 100%.

Загальний вигляд надрукованих лопаток для проведення експериментальних досліджень на розтяг приведено на рис.16 та 17.



а б в г

Рис.16. Тестові лопатки, надруковані з подрібнених часток полімеру ABS з різним заповненням: а-25%; б-50%; в-75%; г-100%



а б в г

Рис.17. Тестові лопатки, надруковані з подрібнених часток полімеру TPU з різним заповненням: а-25%; б-50%; в-75%; г-100%

В подальшому надруковані зразки піддавалися одновісному розтягу на розривній машині (рис.18).



а



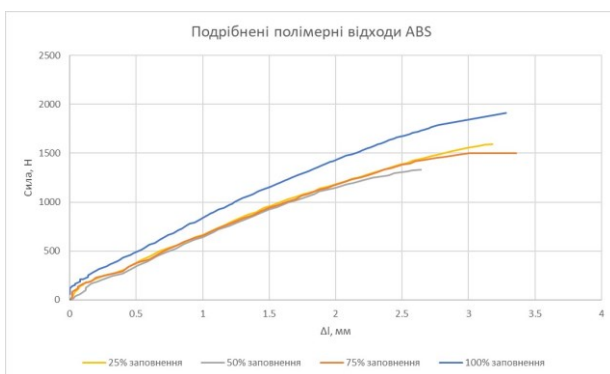
б

Рис.18. Процес одновісного розтягу лопаток: а-ABS пластик; б-TPU пластик

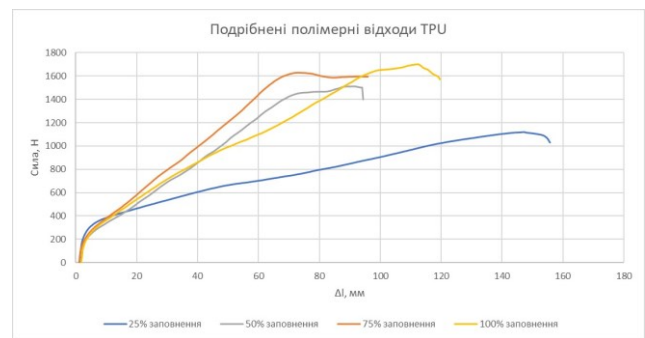
Діаграми руйнувань зразків (лопаток), виготовлених з подрібнених полімерних відходів ABS та TPU з величиною внутрішнього заповнення 25%, 50%, 75% та 100% приведено на рис.19.

Діаграми руйнувань зразків (лопаток), виготовлених з філаменту ABS та TPU з величиною внутрішнього заповнення 25%, 50%, 75% та 100% представлено на рис.20.

Діаграми руйнувань зразків, виготовлених з полімеру ABS із 100% внутрішнім заповненням наведено на рис.21.



а



б

Рис.19. Діаграми руйнувань зразків, виготовлених з подрібнених полімерних відходів з різною величиною внутрішнього заповнення: а-ABS; б-TPU

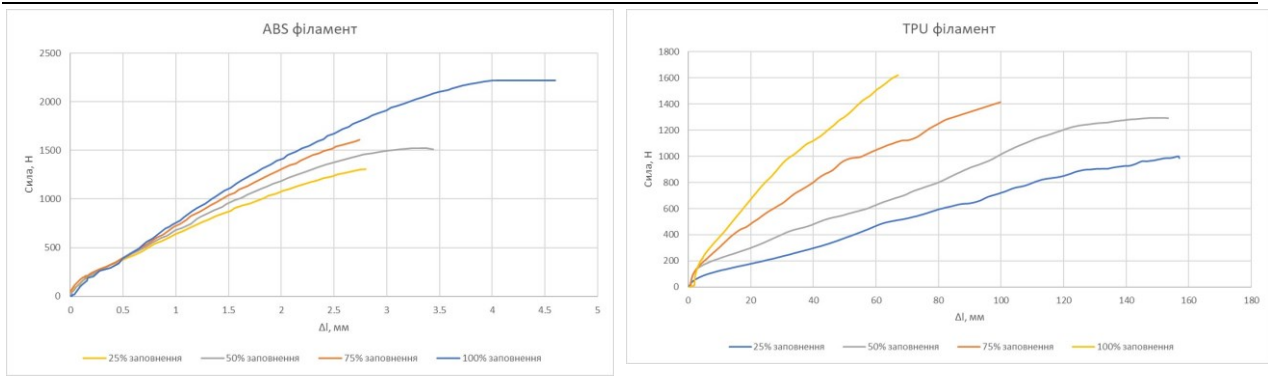


Рис.20. Діаграми руйнувань зразків, виготовлених з філаменту з різною величиною внутрішнього заповнення: а-ABS; б-TPU

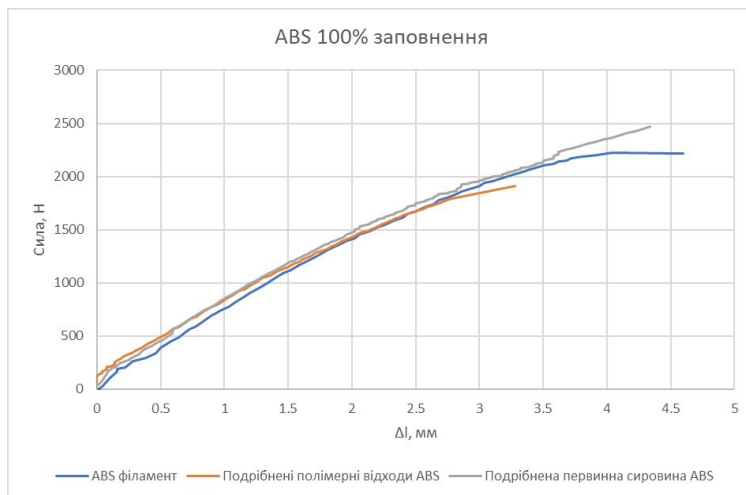


Рис.21. Діаграми руйнувань зразків, виготовлених з полімеру ABS із 100% внутрішнім заповненням

Значення механічних характеристик зразків, виготовлених методом 3D-друку з полімерів ABS та TPU з різним внутрішнім заповнення отримані при випробовуванні на одновісний розтяг приведені в табл.4-8.

Табл.4.

Значення механічних характеристик зразків, виготовлених методом 3D-друку з полімеру ABS при 100% внутрішньому заповненні при одновісному розтягу

№ п/п	Матеріал	Максимальне зусилля розтягу, Н	Міцність на розтяг, МПа
1	ABS філамент	2220,98	44,42
2	Подрібнені полімерні відходи ABS	1912,95	38,26
3	Подрібнена первинна сировина ABS	2467,22	49,34

Табл.5.

Значення механічних характеристик зразків, виготовлених методом 3D-друку з подрібнених полімерних відходів TPU при одновісному розтягу

№ п/п	Матеріал	Величина внутрішнього заповнення, %	Максимальна сила, Н	Міцність на розтяг, МПа
1	Подрібнені полімерні відходи TPU	25	1120,00	22,40
2		50	1510,84	30,22
3		75	1597,17	31,94
4		100	1701,74	34,03

Табл.6.

Значення механічних характеристик зразків, виготовлених методом 3D-друку з TPU філаменту при одновісному розтягу

№ п/п	Матеріал	Величина внутрішнього заповнення, %	Максимальна сила, Н	Міцність на розтяг, МПа
1	TPU філамент	25	1000,52	20,01
2		50	1294,72	25,89
3		75	1415,14	28,30
4		100	1621,59	32,43

Табл.7.

Значення механічних характеристик зразків, виготовлених методом 3D-друку з подрібнених полімерних відходів ABS при одновісному розтягу

№ п/п	Матеріал	Величина внутрішнього заповнення, %	Максимальна сила, Н	Міцність на розтяг, МПа
1	Подрібнені полімерні відходи ABS	25	1595,40	31,91
2		50	1333,38	26,67
3		75	1502,21	30,04
4		100	1912,95	38,26

Табл.8.

Значення механічних характеристик зразків, виготовлених методом 3D-друку з ABS філаменту при одновісному розтягу

№ п/п	Матеріал	Величина внутрішнього заповнення, %	Максимальна сила, Н	Міцність на розтяг, МПа
1	TPU філамент	25	1305,61	26,11
2		50	1520,94	30,42
3		75	1608,35	32,17
4		100	2197,73	43,95

Аналіз даних, наведених в табл. 4, показав, що найбільшу міцність на розтяг мають зразки виготовлені на 3D-принтері із шнековим екструдером з подрібненої первинної сировини ABS. Далі йдуть зразки виготовлені із філаменту (зменшення міцності на 11%). Найнижчу міцність мають лопатки, надруковані із вторинної сировини, а саме з подрібнених відходів 3D-друку (зменшення на 29%).

Фото місць розриву лопаток з ABS пластику, зроблені з використанням цифрової камери представлені на рис.22.

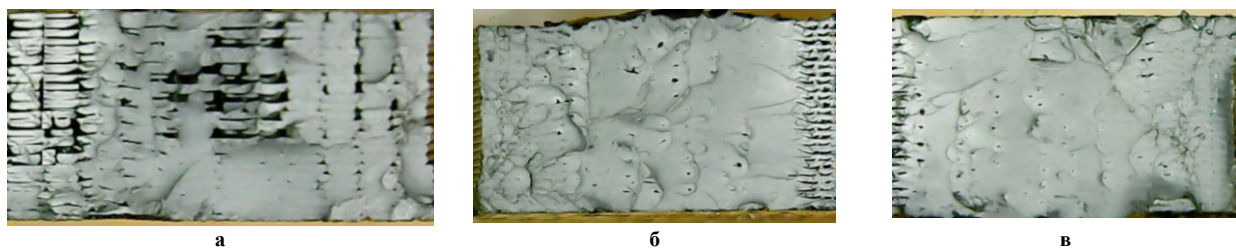


Рис.22. Фото місць розриву лопаток з ABS пластику виготовлених з: а-подрібнених полімерних відходів; б-філаменту; в-подрібненої первинної сировини

Аналіз структури зразків показав, що найкраще внутрішнє заповнення має зразок, виготовлений з подрібненої первинної сировини (гранул) з використанням 3D-принтера з шнековим екструдером. Цим і пояснюється, що даний зразок має найбільшу міцність на розтяг серед трьох матеріалів.

Зразки ABS пластику з різним ступенем заповнення після статичного випробування на розтяг наведено на рис.23 та 24, а.

Зразки TPU пластику з різним ступенем заповнення після статичного випробування на розтяг наведено на рис. 24, б.



Рис.23. Зразки ABS після статичного випробування на розтяг виготовлені з: а-філаменту; б-подрібнених полімерних відходів



Рис.24. Зразки ABS та TPU пластиків після статичного випробування на розтяг виготовлені з філаменту та подрібнених часток полімеру: а-ABS; б-TPU

Проведений аналіз зразків з ABS пластику після розриву (рис.23, 24, а) показав, що процес їх руйнування був практично однаковим незалежно від ступеня заповнення і виду матеріалу (філамент, подрібнені частки). Із частин лопаток після розриву видно, що у всіх випадках матеріал розривався біля горловини зразка без втрати фрагмента лопатки. Для зразків із TPU (рис.24, б) ситуація дещо інша. Розрив лопаток відбувався як біля горловини так і в різних частинах робочої зони з втратою фрагментів зразка. При розриві лопаток, виготовлених із філаменту в процесі розтягу відбувалося відшарування окремих ниток і здійснювався поетапний їх розрив. Це можна було також спостерігати по скачках сили розриву на отриманих графіках залежності зусилля розриву від видовження.

Точність деталі визначається як міра відповідності реальних розмірів виготовленої деталі до її проектних розмірів, вказаних у кресленні чи технічній документації [37]. Це включає в себе відхилення від заданих габаритів, форм, положень поверхонь і кутів. Точність важлива для забезпечення правильної взаємозамінності деталей та їх функціональності у складі механізмів і машин. Оскільки в 3D-принтерах використовується декілька рухомих частин, то досягти 100% точності практично не можливо. Точність, як правило, приводиться у відсотках або міліметрах. Точність виготовлення об'єктів методом 3D-друку варіюється в залежності від виду друку і налаштування принтера. Для настільних 3D-принтерів FDM стандартним є допуск приблизно $\pm 0,5$ мм, що є показником мінімальної точності в розмірах надрукованих деталей.

Дослідні тестові зразки для визначення точності 3D-друку, надруковані з використанням двох 3D-принтерів (рис.1, 2), мають форму куба з розмірами $20 \times 20 \times 20$ мм (рис.25) [38].

Параметри 3D-друку для виготовлення тестових кубиків з філаментів та подрібнених часток ABS та TPU пластиків аналогічні до налаштувань принтера при друку тестових лопаток (табл.9 та 10).

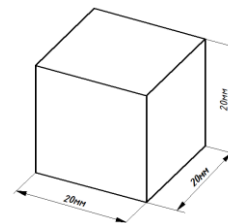


Рис.25. Форма і розмір тестового зразка

Було надруковано 12 тестових зразків: по три з філаменту ABS та TPU на 3D-принтері Anycubic Mega S та по три з подрібнених часток полімеру на 3D-принтері Anycubic Mega S з шнековим екструдером.

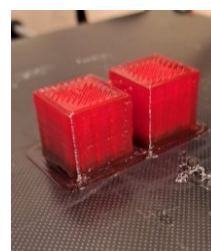
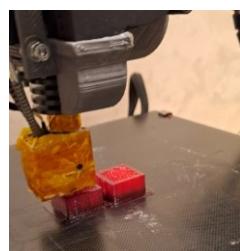


Рис.26. Процес виготовлення тестового зразка на 3D-принтері, що друкує подрібненими частками пластику TPU: а-процес друку тестового зразка; б-готовий тестовий зразок

Приклад виготовлення зразка із подрібнених полімерних часток TPU на принтері з шнековим екструдером показано на рис.26.

Надруковані зразки приведені на рис.27.

Надруковані зразки, отримані у вигляді куба, вимірювалися за допомогою цифрового електронного штангенциркуля (рис.28). Розміри куба вимірювалися із усіх сторін у трьох місцях для трьох надрукованих зразків (рис.17). Далі визначалося усереднене значення як кінцевий результат. Результати вимірювань заносилися в табл.9 і 10.



Рис.27. Тестові зразки виготовлені методом 3D-друку із полімеру: а-TPU (філамент); б-TPU (подрібнена частка); в-ABS (філамент); г-ABS (подрібнена частка)



Рис.28. Вимірювання надрукованих зразків за допомогою цифрового штангенциркуля: а - ABS (подрібнені відходи); б- TPU (подрібнені відходи)

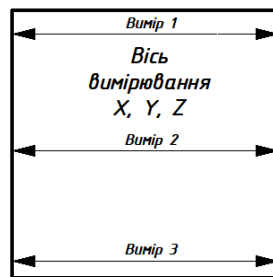


Рис.29. Схема вимірювання розмірів тестового зразка у вигляді куба

Табл.9.

Результати вимірювання розмірів тестових зразків з ABS пластику

Матеріал	Вісь вимірювання	Середнє значення величини розміру, мм			Середнє значення, мм	Відхилення, мм
		Вимір 1	Вимір 2	Вимір 3		
ABS, філамент, Ø 1,75мм	X	20,03	20,05	20,04	20,04	0,04
	Y	19,96	19,98	19,93	19,96	-0,04
	Z	19,95	20,0	19,97	19,97	-0,03
ABS, подрібнені відходи, Ø 2,5 мм	X	19,97	19,94	20,05	19,99	-0,01
	Y	20,08	20,0	19,98	20,02	0,02
	Z	20,04	19,99	19,99	20,01	0,01

При ідеальному калібруванні 3D-принтера відхилення від заданих габаритів тестового кубика повинно бути в межах 0,025 мм. Аналізуючи результати вимірювань з табл. 9 і 10, можна зробити висновок про те, що тестові зразки у вигляді кубика, надруковані з філаменту та подрібнених відходів пластиків ABS та TPU, мають відхилення, які в деяких випадках знаходяться в межах допуску 0,025 мм. В інших не виходять за межі допуску ±0,5 мм для настільних 3D-принтерів. Гірші результати показав друк з використанням TPU пластику. Це можна пояснити складністю підбору параметрів для 3D-друку філаментом, а ще і подрібненими відходами.

Поліпшення точності можна добитися додатковим калібруванням та налаштуванням параметрів слайсера (програмного забезпечення Cura).

Результати вимірювання розмірів тестових зразків з TPU пластику

Матеріал	Вісь вимірювання	Середнє значення величини розміру, мм			Середнє значення, мм	Відхилення, мм
		Вимір 1	Вимір 2	Вимір 3		
TPU, філамент, Ø 1,75мм	X	19,92	19,91	20,07	19,97	-0,03
	Y	19,89	19,92	19,95	19,92	-0,08
	Z	19,93	19,91	19,94	19,93	-0,07
TPU, подрібнені відходи, Ø 2,5 мм	X	20,06	20,04	20,09	20,06	0,06
	Y	20,08	20,09	20,10	20,09	0,09
	Z	19,99	20,10	19,96	20,02	0,02

Якісний друк на 3D-принтері характеризується відсутністю дефектів, чіткими краями і рівномірними поверхнями. Аналіз тестових зразків, надрукованих з подрібнених часток, показав, що кубики мають рівні грані та відповідають заданим розмірам без перекосів з частковими відхиленнями. Це свідчить про правильне налаштування принтера і забезпечення оптимальних умов друку. Наявність однакової якості у зразках із різних матеріалів також демонструє стабільність процесу друку і ефективність використання різних видів сировини.

Відсутність розшарування між шарами у 3D-друкованих зразках говорить про те, що матеріал відмінно зливається між шарами, забезпечуючи міцність і цілісність виробу. Такий результат свідчить про правильно вибрану температуру друку, достатню адгезію між шарами та оптимальну швидкість екструзії, що важливо для отримання деталей з високими експлуатаційними характеристиками.

Використання шнекової екструзії для 3D-друку поліпшує заповнення полімером виробу, оскільки шнек забезпечує більш рівномірну та стабільну подачу матеріалу. Це дозволяє краще контролювати процес екструзії, забезпечуючи щільність і однорідність шарів. Також, завдяки точному контролю над швидкістю подачі, шнековий екструдер може ефективно працювати з різними видами полімерів, включаючи вторинно перероблені матеріали, що сприяє виготовленню виробів високої якості.

В загальному, можна відзначити, що розроблений шнековий екструдер для 3D-пристрою має достатню точність та забезпечує високу якість друку. Він може бути використаний для виготовлення готових виробів та деталей різного призначення.

Висновки

У статті проведено експериментальне дослідження зразків, виготовлених із подрібнених полімерних відходів на 3D-принтері зі шнековим екструдером. Проаналізовано механічні властивості виробів, друкованих на 3D-принтерах. Для дослідження використано два 3D-принтери з різними типами екструдерів. Удосконалено вимірвальну частину розривної машини, а саме: встановлено датчики для точного вимірювання та розроблено програмне забезпечення для аналізу даних. Отримано діаграми розтягу надрукованих зразків, які дали змогу встановити їх максимальні зусилля руйнування та міцність на розтяг. Вивчено руйнування зразків, що дасть змогу вдосконалити процес друку. Проведено порівняння точності 3D-друку з використанням тестових зразків та визначено шляхи її покращення.

Література

1. Ткаченко О.К., Рудніцький В.Л., Зіновчук А.В. Методика наукових досліджень. – Житомир: Вид-во ЖДУ ім. І.Франка. 2012. – 151 с.
2. Методологія та організація наукових досліджень: навч. посіб. / Л.Г. Ліпич, С.М. Бортнік, І.Г. Волинець та ін.; за заг. ред. Л.Г. Ліпич. – Луцьк: Вежа-Друк, 2018. – 220 с.
3. Методи теоретичних і експериментальних досліджень. Електронний навчальний посібник [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/ophv_12/page8.html.
4. Методи та засоби експериментальних досліджень: навч. посіб. / Г.Б. Параска, Д.В. Прибера, П.С. Майдан. – Київ: Кондор-Видавництво, 2017. – 138 с.
5. Alexandre A., Cruz Sanchez F. A., Boudaoud H., Camargo M., Pearce J. M. Mechanical Properties of Direct Waste Printing of Polylactic Acid with Universal Pellets Extruder: Comparison to Fused Filament Fabrication on Open-Source Desktop Three-Dimensional Printers. 3D printing and additive manufacturing. Volume 7. Number 5. 2020. DOI: 10.1089/3dp.2019.0195.
6. Pagés-Llobet A., Espinach F. X., Julián F., Oliver-Ortega H., Méndez J. A. Effect of Extruder Type in the Interface of PLA Layers in FDM Printers: Filament Extruder Versus Direct Pellet Extruder.
7. Abeykoon Ch., Sri-Amphorn P., Fernando A. Optimization of Fused Deposition Modeling Parameters for Improved PLA and ABS 3D Printed Structures. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. March 2020. DOI: 10.1016/j.ijlmm.2020.03.003.
8. Budiono H.S., Hilmy F., Taufik I. The Effect of Printing Speed Variations on Dimensional Stability of 3D Printing Results Made from Waste Bottle Filament. Jurnal E-Komtek. Vol. 7, No. 1 (2023) - P. 187-194.
9. Zubrzycki J., Quirino E., Staniszewski M., Marchewka M. Influence of 3D Printing Parameters by FDM

- Method on the Mechanical Properties of Manufactured Parts. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2022. 16 (5). - P.52-63.
10. і3 Mega S [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/nnpgo>.
 11. Поліщук А.О. Розробка конструкції шнекового екструдера 3D-принтера, що використовує гранули або подрібнені частки полімеру в якості вихідної сировини. *Технології та інжиніринг*. 2023. № 5. С.33-49.
 12. Штангенциркуль цифровий 150мм точність 0,01mm [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/oudpj>.
 13. Машина для випробування текстильних матеріалів PT-250M-2 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://asma.com.ua/files/91/1511096847inform-rt-250.pdf>.
 14. Чумакова С.В., Поліщук О.С., Кармаліта А.К. Дослідження процесу вирубання отворів під металеву фурнітуру у виробках легкої промисловості. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2011. №5. С.34-41.
 15. Чумакова С.В., Поліщук О.С. Дослідження процесу закріплення металевих люверсів у виробках легкої промисловості в квазістатичному режимі. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2013. №2. С.147-153.
 16. S-Type Alloy Steel Load Cell [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://foilresistors.com/docs/12056/619.pdf>.
 17. Поліщук О.С., Поліщук А.О., Лісевич С.П., Залізецький А.М., Мельник В.І. Виготовлення виробів та деталей методом 3D-друку з композитних ниток з високим вмістом металу. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2022. №3. С.104-110.
 18. Поліщук А., Поліщук О., Лісевич С., Урбанюк Є., Рубанка М. Композиційні суміші на основі синтетичних полімерів і наповнювачів та обладнання для 3D-друку ними. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2023. № 2. Ч.1. С. 104-110.
 19. Оптичні лінійні енкодери ASD 300 мм 1 мкм [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://prom.ua/ua/p/1985106501-opticheskie-linejnye-enkodery.html>.
 20. Олексишен В.О. Вдосконалення обладнання для одержання полімерних виробів методом просторового друку : дис. ... доктора філософії : 133 «Галузеве машинобудування» / Олексишен Віталій Олександрович. – Київ : НТУ України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2021.– 175 с.
 21. HX711-modul [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.kosmodrom.ua/datchik-tisku/hx711-modul.html>.
 22. Arduino Uno R3 Atmega328P [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/otjqc>.
 23. Fritzing [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://fritzing.org/>.
 24. Java [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/otmdx>
 25. Цензура М.О., Десятко А.М. *Технологія Java: навчальний посібник*. – К.: КНТУ, 2021. – 468с.
 26. Welcome to Processing [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.processing.org/>.
 27. Бондаренко Л.Ю. Лабораторний практикум з механіки матеріалів і конструкцій [Електронний ресурс]: навч. посібн. / Л.Ю. Бондаренко, О.О. Вершков, Г.В. Антонова. – Мелітополь: ТДАТУ, 2017. – 183с.
 28. Czyzewski P., Marciniak D., Nowinka B., Borowiak M., Bielinski M. Influence of Extruder's Nozzle Diameter on the Improvement of Functional Properties of 3D-Printed PLA Products. *Polymers*. 2022. 14. <https://doi.org/10.3390/polym14020356>.
 29. ISO 527-1:2019(en) Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:527:-1:ed-3:v1:en>
 30. International standard ISO 527-1. Second edition 2012-02-15 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/ouzu>
 31. ASTM D638-14 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.astm.org/d0638-14.html>.
 32. D638-14 «Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics» [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/ovaea>.
 33. TPU 90A чорний [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/ovljm>.
 34. Solidworks у завданнях 3D моделювання та інжинірингу технічних систем. Навч. посібник / В.Я. Ворошук, Т.М. Вітенько. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2021. - 164 с.
 35. Манжілевський О.Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування : навчальний посібник / О.Д. Манжілевський, Р.Д. Іскович-Лотоцький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 105 с.
 36. Поліщук А., Скиба М. Обґрунтування конструкції сопла екструдера 3D-принтера, що використовує гранули та подрібнені частки полімеру в якості вихідної сировини. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2023. №5. Ч. 1. С.192-204.
 37. Точність виготовлення [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://surl.li/ovdbm>.
 38. 3D моделі для тесту друку [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://3dprinters.biz.ua/3d_printer_test/.

References

1. Tkachenko O.K., Rudnitskiy V.L., Zinovchuk A.V. Methodology of scientific research. - Zhytomyr: Publishing House of ZhDU named after I. Franko. 2012. – 151 p.
2. Methodology and organization of scientific research: teaching. manual / L.G. Lypych, S.M. Bortnik, I.H. Volynets and others. ; in general ed. L.G. Lipich – Lutsk: Vezha-Druk, 2018. – 220 p.
3. Methods of theoretical and experimental research. Electronic study guide [Electronic resource] - Resource access mode: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/ophv_12/page8.html.
4. Methods and means of experimental research: teaching. manual / G.B. Paraska, D.V. Prybega, P.S. Maidan – Kyiv: Condor Publishing House, 2017. – 138 p.
5. Alexandre A., Cruz Sanchez F.A., Boudaoud H., Camargo M., Pearce J.M. Mechanical Properties of Direct Waste Printing of Polylactic Acid with Universal Pellets Extruder: Comparison to Fused Filament Fabrication on Open-Source Desktop Three-Dimensional Printers. 3D printing and additive manufacturing. Volume 7. Number 5. 2020. DOI: 10.1089/3dp.2019.0195.
6. Pagés-Llobet A., Espinach F. X., Julián F., Oliver-Ortega H., Méndez J. A. Effect of Extruder Type in the Interface of PLA Layers in FDM Printers: Filament Extruder Versus Direct Pellet Extruder.
7. Abeykoon Ch., Sri-Amphorn P., Fernando A. Optimization of Fused Deposition Modeling Parameters for Improved PLA and ABS 3D Printed Structures. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. March 2020. DOI: 10.1016/j.ijlmm.2020.03.003.
8. Budiono H.S., Hilmy F., Taufik I. The Effect of Printing Speed Variations on Dimensional Stability of 3D Printing Results Made from Waste Bottle Filament. Jurnal E-Komtek. Vol. 7, No. 1 (2023) - P. 187-194.
9. Zubrzycki J., Quirino E., Staniszewski M., Marchewka M. Influence of 3D Printing Parameters by FDM Method on the Mechanical Properties of Manufactured Parts. Advances in Science and Technology Research Journal. 2022. 16 (5). - P.52-63.
10. i3 Mega S [Electronic resource] - Resource access mode: <http://surl.li/nmrpo>
11. Polishchuk A.O. Development of a screw extruder design for a 3D printer that uses granules or crushed polymer particles as raw materials. Technologies and engineering. 2023. No. 5. P.33-49.
12. Caliper digital 150mm accuracy 0.01mm [Electronic resource] - Resource access mode: <http://surl.li/oudpj>.
13. Machine for testing textile materials RT-250M-2 [Electronic resource] - Resource access mode: <https://asma.com.ua/files/91/1511096847inform-rt-250.pdf>.
14. Chumakova S.V., Polishchuk O.S., Karmalita A.K. Study of the process of cutting holes for metal fittings in products of light industry. Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Technical sciences. 2011. No. 5. P.34-41.
15. Chumakova S.V., Polishchuk O.S. Study of the process of fixing metal eyelets in light industry products in a quasi-static mode. Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Technical sciences. 2013. No. 2. P.147-153.
16. S-Type Alloy Steel Load Cell [Electronic resource] - Resource access mode: <https://foilresistors.com/docs/12056/619.pdf>.
17. Polishchuk O.S., Polishchuk A.O., Lisevich S.P., Zalitzkyi A.M., Melnyk V.I. Production of products and parts by 3D printing method from composite threads with a high metal content. Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Technical sciences. 2022. No. 3. P.104-110.
18. Polishchuk A., Polishchuk O., Lisevich S., Urbanyuk E., Rubanka M. Composite mixtures based on synthetic polymers and fillers and equipment for 3D printing with them. Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Technical sciences. 2023. No. 2. Part 1. P. 104-110.
19. Optical linear encoders ASD 300 mm 1 μm [Electronic resource] - Resource access mode: <https://prom.ua/ua/p1985106501-opticheskije-linejnye-enskodery.html>.
20. Oleksyshen V.O. Improvement of equipment for the production of polymer products by the method of spatial printing: diss. ... doctor of philosophy: 133 "Industrial mechanical engineering" / Oleksyshen Vitaly Oleksandrovych. - Kyiv: National Technical University of Ukraine "KPI named after Igor Sikorsky", 2021. - 175 p.
21. HX711-modul [Electronic resource] - Resource access mode: <https://www.kosmodrom.ua/datchik-tisku/hx711-modul.html>.
22. Arduino Uno R3 Atmega328P [Electronic resource] - Resource access mode: <http://surl.li/otjqc>.
23. Fritzing [Electronic resource] - Resource access mode: <https://fritzing.org/>.
24. Java [Electronic resource] - Resource access mode: <http://surl.li/otmdx>
25. Censorship M.O., Desyatko A.M. Java Technology: A Study Guide. - K.: KNTU, 2021. - 468p.
26. Welcome to Processing [Electronic resource] - Resource access mode: <https://www.processing.org/>.
27. Bondarenko L.Yu. Laboratory workshop on mechanics of materials and structures [Electronic resource]: training. manual / L.Yu. Bondarenko, O.O. Vershkov, G.V. Antonov. – Melitopol: TDATU, 2017. – 183 p.
28. Czyzewski P., Marciniak D., Nowinka B., Borowiak M., Bielinski M. Influence of Extruder's Nozzle Diameter on the Improvement of Functional Properties of 3D-Printed PLA Products. Polymers. 2022. 14. <https://doi.org/10.3390/polym14020356>.
29. ISO 527-1:2019(en) Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles [Electronic resource] - Resource access mode: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:527:-1:ed-3:v1:en>
30. International standard ISO 527-1. Second edition 2012-02-15 [Electronic resource] - Resource access mode: <http://surl.li/ouzu>
31. ASTM D638-14 [Electronic resource] - Resource access mode: <https://www.astm.org/d0638-14.html>.
32. D638-14 "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics" [Electronic resource] - Resource access mode: <http://surl.li/ovaea>.
33. TPU 90A black [Electronic resource] - Resource access mode: <http://surl.li/ovljm>.
34. Solidworks in tasks of 3D modeling and engineering of technical systems. Education manual / V.Ya. Voroshchuk, T.M. Welcome Ternopil: FOP Palyanytsia V.A., 2021. - 164 p.
35. Manzhilevsky O.D. Modern additive technologies of 3D printing. Features of practical application: study guide / O.D. Manzhilevskyi, R.D. Iskovich-Lototskyi. – Vinnytsia: VNTU, 2021. – 105 p.
36. Polishuk A., Skyba M. Justification of the design of the extruder nozzle of a 3D printer that uses granules and crushed polymer particles as raw materials. Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Technical sciences. 2023. No. 5. Part 1. P.192-204.
37. Manufacturing accuracy [Electronic resource] - Resource access mode: <http://surl.li/ovdbm>.
38. 3D models for print test [Electronic resource] - Resource access mode: https://3dprinters.biz.ua/3d_printer_test/.