

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова робота  
на правах рукопису

ПОЛІЩУК АНДРІЙ ОЛЕГОВИЧ

УДК 678.027.3

**ДИСЕРТАЦІЯ**


УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ТРИВИМІРНОГО ДРУКУ ДЛЯ  
ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТА ВИРОБІВ ЛЕГКОЇ  
ПРОМИСЛОВОСТІ

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування

Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 А.О. Поліщук

Науковий керівник: Скиба Микола Єгорович, доктор технічних наук, професор

## АНОТАЦІЯ

*Поліщук А.О.* Удосконалення обладнання тривимірного друку для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування. – Хмельницький національний університет, Хмельницький, 2024.

На сучасному етапі зростає попит на обладнання, яке реалізує інноваційні технології в області тривимірного друку, особливо в легкій промисловості, яка включає швейне та взуттєве виробництво. Адитивні технології набувають все більшого розповсюдження у виробничих процесах різних галузей промисловості. Вони забезпечують скорочення витрат, прискорення виготовлення нових виробів, гнучкість підприємства тощо. Застосування шнекових екструдерів в обладнанні тривимірного друку, які використовують в якості вихідної сировини вторинні полімерні матеріали, створює нові можливості для зниження витрат на сировину та вирішення питання їх утилізації. Тема дослідження є актуальною, оскільки на сьогодні підприємства легкої промисловості потребують удосконалення та оптимізації виробничих процесів за рахунок впровадження новітнього обладнання та технологій, здатних вирішити цілу низку проблем, які є ключовим фактором успіху, зокрема підвищення якості та конкурентоспроможності готової продукції. Тому будь-які дослідження у зазначеному напрямку мають значний потенціал для внесення важливого вкладу у технологічний розвиток та інновації в легкій промисловості.

У результаті виконання дисертаційної роботи було розв'язано актуальну науково-технічну задачу удосконалення обладнання тривимірного друку для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Один із розділів роботи виконаний у рамках договору про творчу співдружність між

ПП «Кредо» та Хмельницьким національним університетом: «Розробка обладнання для рециклінгу полімерних відходів взуттєвого виробництва» (№ 02-2021ТС, номер державної реєстрації 0121U110126), 2021-2024 р.р.

*Об'єктом дослідження є процеси тривимірного друку при виготовленні деталей та виробів легкої промисловості.*

*Предметом дослідження є шнековий екструдер обладнання тривимірного друку для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості.*

*Метою дисертаційної роботи є удосконалення обладнання тривимірного друку за рахунок встановлення шнекового екструдера, що використовує гранули чи подрібнені відходи полімерів у якості вихідної сировини для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості.*

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

– вперше експериментально отримано регресійні рівняння, що враховують залежність об'ємної продуктивності шнекового екструдера від основних параметрів: діаметра подрібнених полімерних відходів, частоти обертання шнеку та температури плавлення полімеру для двох видів пластиків – ABS та TPU, що дає змогу оптимізувати процес виготовлення деталей та виробів легкої промисловості;

– отримав подальший розвиток аналітичний метод визначення основних параметрів шнекового екструдера обладнання тривимірного друку, який включає розрахунок коефіцієнта опору сопел, об'ємної продуктивності, тиску в шнековому каналі, потужності приводу, що дає можливість оптимізації конструктивних елементів екструзійного устаткування;

– розроблено нову систему охолодження шнекового екструдера обладнання тривимірного друку з використанням теплового бар'єру і повітряного обдуву та досліджено у програмному середовищі SolidWorks Simulation розподіл температур в різних його зонах, що запобігає перегріву полімерного матеріалу в завантажувальному бункері та підтримує стабільність процесу виготовлення деталей і виробів;

– експериментально здійснено дослідження характеристик подрібнених полімерних відходів, як вихідної сировини для шнекового екструдера обладнання тривимірного друку, та побудовано регресійну модель залежності насипної густини від діаметра часток, які є важливими для розрахунку тиску в зоні живлення екструдера.

Практичне значення одержаних результатів полягає у використанні удосконаленого обладнання тривимірного друку на підприємствах легкої промисловості та на фірмах, що спеціалізуються на продажі та сервісному обслуговуванні швейного устаткування. Воно дозволяє ефективно вирішувати задачі швидкого виготовлення окремих елементів та відновних деталей. Використання вторинної сировини у тривимірному друці сприяє зниженню виробничих витрат, відкриваючи нові перспективи для сталого розвитку легкої промисловості.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені на ПМП «Вітнел», ПП «КМ-Поділля», ТОВ «Спарк-Швейне обладнання», а також в освітньому процесі Хмельницького національного університету на кафедрі машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем для спеціальності 133 Галузеве машинобудування, зокрема при вивченні дисциплін «Сучасні 3D-технології виробництва», «Сучасні технології та обладнання виробництв галузі».

У вступній частині представлено комплексний огляд дослідження, який включає обґрунтування актуальності теми, визначення цілей та задач, а також зв'язок роботи з науковими планами, програмами та темами. Сформульовано мету, об'єкт і предмет дослідження, описано наукову новизну та практичне застосування результатів роботи.

У першому розділі здійснюється аналіз сучасного стану та перспектив застосування технологій тривимірного друку в легкій промисловості. Розглядаються способи виготовлення виробів, типи 3D-принтерів, особливо з шнековою екструзією, та їх застосування у різних галузях. Розглядаються екструзійні сопла, полімерні матеріали 3D-друку, відходи пластику як

сировина для переробки на обладнанні з шнековим екструдером та можливість використання технології тривимірного друку у легкій промисловості.

У другому розділі розглядаються ключові характеристики шнекового екструдера обладнання тривимірного друку, включаючи детальний аналіз його основних параметрів в зонах живлення та дозування. Наводяться формули визначення об'ємної продуктивності екструдера, яка є ключовою для оцінки його загальної ефективності. Здійснюється розробка, аналіз конструкцій сопел, які є ключовими для якісної екструзії та розрахунок їх коефіцієнту опору. Наводиться залежність для визначення потужності приводу екструдера, яка впливає на стабільність та ефективність його роботи в процесі тривимірного друку.

У третьому розділі здійснюється удосконалення обладнання тривимірного друку з шнековим екструдером для переробки подрібнених полімерів. Наведено розроблений прототип 3D-принтера, здатного переробляти гранули або подрібнені відходи полімерів. Розроблено та виготовлено шнековий екструдер, синхронізовано його роботу із обладнанням тривимірного друку. Досліджено систему охолодження шнекового екструдера, яка підтримує стабільність процесу тривимірного друку та знижує його перегрів.

В четвертому розділі здійснюється визначення експериментальним шляхом фізико-механічних властивостей подрібнених полімерних відходів, що використовуються як сировина у шнековому екструдері обладнання тривимірного друку. Виводяться регресійні рівняння об'ємної продуктивності в залежності від діаметра подрібненого полімеру, частоти обертання шнеку та температури плавлення пластику. Експериментальне визначення продуктивності екструдера має ключове значення для оцінки його ефективності та оптимізації процесу тривимірного друку.

В п'ятому розділі проводяться експериментальні дослідження фізико-механічних характеристик зразків, виготовлених за допомогою обладнання

об'ємного друку із подрібнених полімерних відходів. Наводяться шляхи та приклади його застосування для створення деталей та виробів легкої промисловості.

У додатках наведено: наукові публікації, в яких відображено основні наукові результати роботи; відомості про апробацію результатів дисертації; патент та акти про впровадження результатів роботи; характеристики обладнання для тривимірного друку, зокрема шнекового екструдера; результати дослідження фізико-механічних характеристик вихідної полімерної сировини; дані до регресійних рівнянь для експериментального визначення об'ємної продуктивності; відомості про основні елементи шнекового екструдера; результати розрахунків; відомості про вимірювальне обладнання.

Ключові слова: обладнання, легка промисловість, тривимірний друк, FDM 3D-принтер, шнековий екструдер, шнек, полімер, бункер, моделювання, SolidWorks, проектування, дослідження, потужність, сипучий матеріал, програма розрахунку.

#### ANOTATION

*Polishchuk A.O.* Improvement of three-dimensional printing equipment for manufacturing parts and products of light industry. – Qualification scientific labor on rights manuscript.

Dissertation on acquisition scientific degree doctor philosophy by specialty 133 Industrial engineering. Khmelnytskyi national university, Khmelnytskyi, 2024.

At the current stage, the demand for equipment that implements innovative technologies in the field of three-dimensional printing is growing, especially in light industry, which includes sewing and shoe production. Additive technologies are becoming increasingly widespread in the production processes of various industries. They provide cost reduction, acceleration of production of new products, flexibility of the enterprise, etc. The using of screw extruders in three-dimensional printing equipment, use secondary polymer materials as raw materials, creates new

opportunities for reducing the cost of raw materials and solving the issue of their disposal. The topic of research is relevant, because today light industry enterprises need to improve and optimize production processes due to the introduction of the latest equipment and technologies capable of solving a number of problems that are a key success factor, in particular, improving the quality and competitiveness of finished products. Therefore, any research in this direction has a significant potential to make an important contribution to technological development and innovation in light industry.

As a result of the dissertation work, the actual scientific and technical problem of improving the three-dimensional printing equipment for the manufacture of parts and products of light industry was solved.

Connection of work with scientific programs, plans, topics. One of the sections of the work was carried out within the framework of the agreement on creative commonwealth between PE «Credo» and Khmelnytskyi National University: «Development of equipment for recycling polymer waste from shoe production» (No. 02-2021TS, state registration number 0121U110126), 2021-2024.

*The object of research* is processes of three-dimensional printing in the manufacture of parts and products of light industry.

*The subject of research* is a screw extruder of three-dimensional printing equipment for the manufacture of parts and products of light industry.

*The purpose of the dissertation* is to improve the three-dimensional printing equipment by installing a screw extruder that uses granules or crushed polymer waste as raw materials for the manufacture of parts and products of light industry.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

– regression equations were experimentally obtained for the first time, taking into account the dependence of the volumetric productivity of the screw extruder on the main parameters: the diameter of the crushed polymer waste, the rotation frequency of the screw and the melting temperature of the polymer for two types of plastics - ABS and TPU, which makes it possible to optimize the process of manufacturing parts and products light industry;

– the analytical method of determining the main parameters of the screw extruder of three-dimensional printing equipment, which includes the calculation of the nozzle resistance coefficient, volumetric productivity, pressure in the screw channel, and drive power, was further developed, which makes it possible to optimize the structural elements of the extrusion equipment;

– a new cooling system for the screw extruder of three-dimensional printing equipment was developed using a thermal barrier and air blowing, and the temperature distribution in its various zones was investigated in the SolidWorks Simulation software environment, which prevents overheating of the polymer material in the loading hopper and supports the stability of the manufacturing process of parts and products;

– an experimental study of the characteristics of crushed polymer waste as raw material for a screw extruder of three-dimensional printing equipment was carried out, and a regression model of the dependence of the bulk density on the diameter of the particles, which is important for calculating the pressure in the feed zone of the extruder, was built.

The practical significance of the obtained results lies in the using of improved three-dimensional printing equipment at light industry enterprises and firms specializing in the sale and service of sewing equipment. It allows you to effectively solve the problems of rapid production of individual elements and replacement parts. The using of secondary raw materials in three-dimensional printing helps to reduce production costs, opening new perspectives for the sustainable development of light industry.

The results of the dissertation research were implemented at PMP «Vitnel», PE «KM-Podillia», LLC «Spark-Sewing Equipment», as well as in the educational process of Khmelnytskyi National University at the Department of Machines and Apparatus, Electromechanical and Energy Systems for the specialty 133 Industrial Mechanical Engineering, in particular when studying the disciplines «Modern 3D production technologies», «Modern technologies and equipment of industry productions».



The introductory part presents a comprehensive review of the research, includes substantiation of the topicality of the topic, definition of goals and objectives, as well as the connection of the work with scientific plans, programs and topics. The goal, object and subject of the research are formulated, scientific novelty and practical application of the work results are described.

In the first chapter, the current state and prospects for the application of three-dimensional printing technologies in light industry are analyzed. Methods of manufacturing products, types of 3D printers, especially with screw extrusion, and their application in various industries are considered. Extrusion nozzles, polymer materials for 3D printing, plastic waste as a raw material for processing on equipment with a screw extruder and the possibility of using three-dimensional printing technology in light industry are considered.

The second section examines the key characteristics of the screw extruder of 3D printing equipment, including a detailed analysis of main parameters in the areas of feeding and dosing. Formulas for determining the volumetric productivity of the extruder are given, which is key to assessing its overall efficiency. The development and analysis of nozzle structures, which are key to high-quality extrusion and the calculation of their resistance coefficient, are carried out. A dependence is given to determine the power of the extruder drive, which affects the stability and efficiency of its operation in the process of three-dimensional printing.

In the third section, three-dimensional printing equipment with a screw extruder for processing crushed polymers is improved. A developed prototype of a 3D printer capable of processing granules or crushed polymer waste is presented. A screw extruder was developed and manufactured, and its operation was synchronized with the 3D printing equipment. The cooling system of the screw extruder, which maintains the stability of the three-dimensional printing process and reduces its overheating, was studied.

In the fourth chapter, the physico-mechanical properties of crushed polymer waste, which are used as raw materials in the screw extruder of three-dimensional printing equipment, are determined experimentally. Regression equations of

volumetric productivity depending on the diameter of the crushed polymer, the rotation frequency of the screw and the melting temperature of the plastic are derived. Experimental determination of extruder performance is key to evaluating its effectiveness and optimizing the 3D printing process.

In the fifth chapter, experimental studies of the physical and mechanical characteristics of the samples made with the help of volumetric printing equipment from crushed polymer waste are carried out. Ways and examples of its application for the creation of parts and products of light industry are given.

The appendices include scientific publications that reflect the main scientific results of the work: information on the approval of the dissertation results; patent and acts on implementation of work results; characteristics of equipment for three-dimensional printing, in particular, a screw extruder; the results of the study of the physical and mechanical characteristics of the initial polymer raw materials; data to regression equations for experimental determination of volumetric productivity; information about the main elements of the screw extruder; calculation results; information about measuring equipment.

Keywords: equipment, light industry, three-dimensional printing, FDM 3D printer, screw extruder, screw, polymer material, hopper, modeling, SolidWorks, projecting, research, power, bulk material, calculation program.

#### Список публікацій здобувача за темою дисертації

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.*

1. Поліщук А., Поліщук О. Розробка методу проектування шнека екструдера 3D-принтера. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2023. № 4. С. 389-402. DOI: <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2023-323-4-389-402>.

*Особистий внесок здобувача: Запропоновано та розроблено метод проектування шнека екструдера обладнання тривимірного друку.*

2. 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. DOI: <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2023-325-5-192-204>.

*Особистий внесок здобувача: Запропоновано та розроблено нові конструкції сопел шнекового екструдера обладнання тривимірного друку, що використовує гранули чи подрібнені частки полімеру в якості вихідної сировини.*

3. 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. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.5.3>.

*Особистий внесок здобувача: Розроблено конструкцію шнекового екструдера, що друкує гранулами або подрібненими частками полімеру, синхронізовано його роботу з елементами 3D-принтера та проведено 3D-друк готових виробів.*

4. Поліщук А.О. Розробка системи охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера. *Технології та інжиніринг*. 2023. № 6. С.53-75. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.6.5>.

*Особистий внесок здобувача: Розроблено систему охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера та з використанням SolidWorks Simulation виконано її аналіз.*

5. Поліщук А.О. Експериментальне дослідження подрібнених полімерних відходів, що використовуються в якості вихідної сировини шнекового екструдера 3D-принтера. *Наукові нотатки. Луцький національний університет*. 2023. Випуск № 76. С. 134-146. DOI:

<https://www.doi.org/10.36910/775.24153966.2023.76.19>.

*Особистий внесок здобувача: Проведено експериментальне дослідження подрібнених полімерних відходів, що використовуються в якості вихідної сировини шнекового екструдера 3D-принтера та визначено властивості подрібнених полімерних часток.*

6. Polishchuk A.; Slavinska A., Polishchuk O., Mytsa V. (2023). Production of details of difficult designs of footwear and clothes with use of technologies of additive production. *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2889. Is. 17. (Scopus). DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0172971>.

*Особистий внесок здобувача: Виготовлено експериментальні зразки методом 3D-друку з гранул термопластичного поліуретану та термоеластопласту та досліджено їх механічні характеристики.*

7. Поліщук А., Скиба М. Експериментальне дослідження зразків, виготовлених із подрібнених полімерних відходів на 3D-принтері зі шнековим екструдером. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2023. № 6. С.292-306. DOI: <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2023-329-6-292-306>.

*Особистий внесок здобувача: Запропоновано методикку експериментальних досліджень. Розроблено вимірювальне обладнання, здійснено дослідження зразків та визначено їх фізико-механічні характеристики.*

8. Поліщук А.О. Експериментальне дослідження об'ємної продуктивності шнекового екструдера 3D-принтера. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2023. №4. С. 117-128. [http://kntu.net.ua/index.php/eng/content/download/111414/628411/file/%D0%92%D1%96%D1%81%D0%BD%D0%B8%D0%BA%204%20\(87\).pdf](http://kntu.net.ua/index.php/eng/content/download/111414/628411/file/%D0%92%D1%96%D1%81%D0%BD%D0%B8%D0%BA%204%20(87).pdf).

*Особистий внесок здобувача: Проведено експериментальні дослідження та отримано регресійні рівняння залежності об'ємної продуктивності від діаметра полімерних часток, частоти обертання шнека та температури плавлення полімеру.*

9. Поліщук А., Місяць В. Моделювання шнекового екструдера 3D-принтера, що використовує гранули або подрібнені відходи полімеру в якості вихідної сировини. *Український журнал прикладної економіки та техніки*. 2023. №4. С.329-334. DOI: <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2023-4-53>.

*Особистий внесок здобувача: Здійснено моделювання шнекового*

екструдера в зоні живлення, що дало змогу визначити продуктивність та тиск у шнековому каналі.

10. Зозуля П.Ф., Поліщук О.С., Поліщук А.О. Перспективи застосування 3D-друку в легкій промисловості. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* 2017. № 4. С.102-104.  
[http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2017/2017\\_4/\(251\)%202017-4-t.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2017/2017_4/(251)%202017-4-t.pdf).

*Особистий внесок здобувача: Описано перспективи та напрямки застосування 3D-друку при виготовленні деталей для обладнання легкої промисловості.*

11. Поліщук О.С., Зозуля П.Ф., Поліщук А.О. Узагальнена класифікація філаментів для 3D-друку. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* 2017. № 6. С.51-59.  
[http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2017/2017\\_6/\(255\)%202017-6-t.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2017/2017_6/(255)%202017-6-t.pdf).

*Особистий внесок здобувача: Складено таблиці з основними технічними характеристиками 3D-філаментів та рекомендаціями по їх використанню для виготовлення деталей та виробів.*

12. Polishchuk, O., Zozulia, P., Polishchuk, A., Maidan, P., Skyba, M., Kostyuk, N., Kravchuk, A. & Kravchuk, O. (2020). Development and research of equipment for processing of granulated polymeric materials via 3d printing for the needs of light industry. *Fibres and Textiles.* 27(4). pp. 75-80. (Scopus). URL: [http://vat.ft.tul.cz/2020/4/VaT\\_2020\\_4\\_10.pdf](http://vat.ft.tul.cz/2020/4/VaT_2020_4_10.pdf).

*Особистий внесок здобувача: Запропоновано конструкцію та розроблено 3D-принтер з FDM-технологією для встановлення шнекового екструдера, що використовує полімерні гранули в якості вихідної сировини.*

13. Зозуля П.Ф., Поліщук О.С., Поліщук А.О. Екструдер для перероблення полімерних матеріалів. Патент на корисну модель №142922 Україна. МПК В29С 48/00, В29С 48/505 (2019.01), заявник і патентовласник Зозуля П.Ф. u201909761; заявл. 12.09.19; опубл. 10.07.20. Бюл. № 13.

<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=269516>.

*Особистий внесок здобувача: Вибрано та описано прототип «Черв'ячний екструдер для полімерних матеріалів», що є найбільш близьким до екструдера для перероблення полімерних матеріалів, який патентується.*

*Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.*

14. Поліщук А.О., Скиба М.Є., Поліщук О.С., Лісевич С.П. Робот-маніпулятор з функцією 3D-друку для виконання операцій легкої промисловості. Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку: матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції (29-30 жовтня 2020 р.): збірник тез. – Луцьк: Луцький НТУ, 2020. – С.71-72. [https://restore.lntu.edu.ua/oldfiles/files12/zbirnik\\_tez\\_luck\\_2020.pdf](https://restore.lntu.edu.ua/oldfiles/files12/zbirnik_tez_luck_2020.pdf).

*Особистий внесок здобувача: Запропоновано ідею використання екструдера для 3D-друку в роботі-маніпуляторі.*

15. Поліщук О.С., Скиба М.Є., Поліщук А.О., Лісевич С.П. Перспективи створення обладнання для виготовлення монофіламенту для 3D-друку. Збірник тез доповідей XX Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсозберігаючі технології та обладнання» (28-29 квітня 2021 р.) / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2021. – С.119-122. [https://ci.kpi.ua/METODA/20\\_teza\\_mizhnarodna.pdf](https://ci.kpi.ua/METODA/20_teza_mizhnarodna.pdf).

*Особистий внесок здобувача: Запропоновано конструктивну схему шнекового екструдера.*

16. Поліщук А.О., Скиба М.Є., Лісевич С.П., Ткачук О.Л. Переробка відходів полімерних матеріалів легкої промисловості у готові вироби з використанням адитивних технологій. Збірник матеріалів VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування» (25-28 травня 2021 р.) м. Луцьк. – С.68-69. <http://surl.li/qrskt>.

*Особистий внесок здобувача: Запропоновано технологію переробки полімерних матеріалів легкої промисловості у готові вироби з використанням адитивних технологій.*

17. Polishchuk A., Skyba M., Polishchuk O., Mitsa V. 3D printing in the manufacture of sewing products. IX Ukrainian-Polish Scientific Dialogues: Conference Proceedings. International Scientific Conference, 20-23 October 2021, Khmelnytskyi (Ukraine). Khmelnytskyi National University, 2021. – pp. 112-114. <https://elar.khmnu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/49279c39-2b87-41a2-b0f7-bfff17ba796/content>.

*Особистий внесок здобувача: Описано можливості використання 3D-друку для виготовлення та оздоблення деталей одягу.*

18. Polishchuk A.O., Skyba M.Ye., Tanski T., Polishchuk O.S. Prospects of recycling polyethylene terephthalate waste into consumables for 3D printers. Мехатронні системи: інновації та інжиніринг: тези доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції, 4 листопада 2021р. – Київ: КНУТД, 2021. – С.92-93. [https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/19210/1/MSIE\\_2021\\_P092-093.pdf](https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/19210/1/MSIE_2021_P092-093.pdf).

*Особистий внесок здобувача: Запропоновано шляхи переробки відходів поліетилентерефталату на витратні матеріали для 3D-принтерів.*

19. Polishchuk A., Tański M.T. Development of technologies and equipment for recycling polyethylene terephthalate waste into consumables and finished product. Material Technologies of Silesia. MTS Conference. Prace Katedry Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych (June 2022). Gliwice, Poland. – pp.131-132. [https://mts.polsl.pl/pl/?page\\_id=43](https://mts.polsl.pl/pl/?page_id=43).

*Особистий внесок здобувача: Запропоновано роторно-ножову дробарку для подрібнення порожнистої тонкостінної тари PET, устаткування для переробки полімерних відходів швейної та взуттєвої промисловості, а також обладнання тривимірного друку для їх переробки.*

20. Поліщук А., Скиба М. 3D-принтер для друку гранулами та подрібненими відходами полімерних матеріалів. Сучасні тенденції розвитку інженерії, технологій та транспорту: збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, 18-19 жовтня 2022 р. – Хмельницький : ХНУ, 2022. – С.367-370. <http://surl.li/qsxkb>.

*Особистий внесок здобувача: Розроблено шнековий екструдер, що друкує подрібненими полімерними матеріалами, отриманими із відходів швейного та взуттєвого виробництва.*

21. Polishchuk A.O., Polishchuk O.S., Rubanka M.M. Prospects of use of «rPET» material in quality of raw materials for 3D printing. Мехатронні системи: інновації та інжиніринг : тези доповідей VI Міжнародної наук.-практ. конф. / Київ : КНУТД, 2022. – р.59.

[https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/20668/1/MSIE\\_2022\\_P059.pdf](https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/20668/1/MSIE_2022_P059.pdf).

*Особистий внесок здобувача: Запропоновано технологію переробки «rPET» тари у готові вироби з використанням 3D-принтера.*

22. Polishchuk O., Bonek M., Polishchuk A., Lisevich S., Grudin V., Matiukh S. Manufacturing of products and parts by 3D printing from composite threads containing metals. The International Student Scientific Conference TalentDetector2023\_Winter: Prace Katedry Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych. Gliwice: Politechnika Śląska. 2023. pp. 12-27.

<https://pimib.polsl.pl/pdf/Talent-Detector-Winter-2023-druk.pdf>.

*Особистий внесок здобувача: Удосконалено конструкцію 3D-принтера для друку композиційними сумішами, що вміщують металеві частки, здійснено друк зразків та проведено експериментальні дослідження їх фізико-механічних характеристик.*

23. Polishchuk A.O., Polishchuk O.S., Skyba M.Ye., Lisevich S.P. Development of technology for processing polymer waste into finished products by 3D printing. Збірник тез доповідей III-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту - 2023»: Збірник тез [Електронний ресурс]. – Вінниця: ВНТУ. – 2023. – С.457-459. ISBN 978-966-641-935-7.

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/778/1355/2610-1>.

*Особистий внесок здобувача: Запропоновано технологію переробки відходів поліестеру на готову продукцію з використанням обладнання тривимірного друку та здійснено експериментальні дослідження.*



24. Polishchuk A., Polishchuk O., Rubanka M. Development of 3D printing equipment using a mixture of polymer material and metal powder. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2023) : матеріали тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 25–26 травня 2023 р.) : у 2 т. / Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.] ; відп. за вип.: Єрошенко Андрій Михайлович [та ін.]. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – Т. 1. – С.204-205. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/wp-content/uploads/2023/06/Tezy-2023-Part-1.pdf>.

*Особистий внесок здобувача: Розроблено модель в SolidWorks та виготовлено екструдер, який друкує композиційними сумішами полімерних матеріалів та металевих часток.*

25. Polishchuk A., Skyba M., Polishchuk O., Lisevich S. Shredding of polymer waste of light industry. Матеріали (тези). IX Міжнародна науково–практична конференція «Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування». – Луцьк,: Вежа-Друк – 2023. – С.55-56. <http://surl.li/qsxja>.

*Особистий внесок здобувача: Підібрано установку для подрібнення відходів лавсану та нейлону, що будуть використовуватися в якості вихідної сировини шнекового екструдера обладнання тривимірного друку.*

26. Polishchuk A., Polishchuk O., Bonek M., Brytan Z., Lisevich S. Development of technology for processing of polymer waste of light industry into finished products using 3D printers. The International Student Scientific Conference TalentDetector2023\_ Summer: Prace Katedry Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych. Gliwice: Politechnika Śląska. 2023. pp. 548-557. <https://pimib.polsl.pl/pdf/Talent-Detector-Summer-2023.pdf>.

*Особистий внесок здобувача: Запропоновано технологію переробки полімерних відходів поліестеру та нейлону в готову продукцію за допомогою пристрою тривимірного друку. Проведено експериментальні дослідження з використанням екструзійної машини.*

27. Поліщук А.О., Скиба М.Є., Поліщук О.С. Фактори, що впливають на нагрівання корпусу екструдера 3D-принтера. Мехатронні системи : інновації та інжиніринг: тези доповідей VII Міжнародної наук.-практ. конф. / Київ : КНУТД, 2023. С.128-129. ISBN 978-617-7763-27-6.  
<https://zenodo.org/records/10202155>.

*Особистий внесок здобувача: Встановлено фактори, що впливають на нагрівання корпусу екструдера обладнання тривимірного друку.*

28. Поліщук А. Нанесення об'ємних зображень на деталі одягу та взуття з використанням 3D-друку. Ресурсозберігаючі технології легкої, текстильної і харчової промисловості: збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції молодих вчених та студентів, 22 листопада 2023 р. – Хмельницький: ХНУ, 2023. – С.178-179.  
<https://tksv.khmnmu.edu.ua/inetconf/2023/khnu2023.pdf>.

*Особистий внесок здобувача: Розроблено класифікацію методів нанесення зображень на тканину. Проведено експериментальні дослідження по створенню об'ємних зображень на деталі одягу та взуття з використанням обладнання тривимірного друку.*

29. Polishchuk A.O., Skyba M.Ye., Polishchuk O.S. Equipment for processing pet bottles into raw materials for the screw extruder of the 3D printer. Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування: матеріали VI Всеукр. наук.-практ. Інтернет-конференції (Полтава, 21-22 грудня 2023 р.) / ПДАУ: ред. кол., О. І. Біловод, С. В. Попов, Р. М. Харак, О. В. Цуркан [та ін.]. – Полтава : ПДАУ, 2023. – С.142-145.  
<https://www.pdau.edu.ua/sites/default/files/node/11413/zbirnyk2022.pdf>.

*Особистий внесок здобувача: Розроблено пристрій для переробки PET пляшок у вихідну сировину екструдера обладнання тривимірного друку.*

*Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації.*

30. 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. Вип. № 67. С.48-52.

[https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi\\_notatky/issue/view/34/42](https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky/issue/view/34/42).

*Особистий внесок здобувача: Описано постановку проблеми та зроблено аналіз досліджень та публікацій по застосуванню технології 3D-друку у взуттєвій промисловості.*

31. 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. DOI: <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-309-3-104-110>.

*Особистий внесок здобувача: Описано металеві наповнювачі та зв'язуючі полімерні матеріали для 3D-принтерів, що друкують композитною сумішшю для створення деталей та виробів.*

32. 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.252-262. DOI: <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2023-319-1-252-262>.

*Особистий внесок здобувача: Запропоновано модель шнекового екструдера для 3D-принтера, що друкує композиційними сумішами.*

33. Поліщук О.С., Поліщук А.О., Пундик С.І. Виготовлення 3D принтера для навчального процесу. *Технічна творчість* : зб. наук. праць. Хмельницький : ХНУ, 2016. № 1. С. 52-55. <http://surl.li/qsxno>.

*Особистий внесок здобувача: Запропоновано ідею впровадження 3D-друку в навчальний процес та виготовлено 3D-принтер Prusa Mendel i2 за проектом RepRap.*

34. Polishchuk O., Skyba M., Polishchuk A., Lisevich S., Zozulia P., Voitsekhov D. Engineering calculations of strength of the details made by 3D-printing method. *Технічна творчість* : зб. наук. праць. Хмельницький : ХНУ, 2021. № 4. С. 33-34. <http://surl.li/nqjxx>.

*Особистий внесок здобувача: Описано сучасні CAE-системи для аналізу*

*міцності виготовлених на 3D-принтері деталей.*

35. Поліщук А., Поліщук О., Скиба М., Лісевич С. 3D-друк виробів для військових та цивільного населення України. *Технічна творчість* : зб. наук. праць. Хмельницький : ХНУ, 2022. № 5. С. 5-6. <http://surl.li/nqjtl>.

*Особистий внесок здобувача: Запропоновано FDM-технологію виготовлення виробів та деталей для військових та цивільного населення України з використанням 3D-принтера, що працює на гранулах або подрібнених відходах полімерних матеріалів.*

36. Polishchuk A., Polishchuk O., Skyba M., Rubanka M. Dependence of the form of the 3D printer extruder screw from the properties of the polymer material. *Технічна творчість* : зб. наук. праць. Хмельницький : ХНУ, 2023. № 6. С. 5-6. <http://surl.li/qsxrx>.

*Особистий внесок здобувача: Обґрунтовано геометрію шнека для шнекового екструдера 3D-принтера, що друкує гранулами або частками полімерних матеріалів.*

37. 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. pp. 462-466. [https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/18936/6/Mono\\_Poland\\_P462-466.pdf](https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/18936/6/Mono_Poland_P462-466.pdf).

*Особистий внесок здобувача: Проведено експериментальні дослідження з визначення насипної маси подрібнених полімерних відходів.*

38. Поліщук А., Поліщук О. Розрахунок шнеку екструдера пристрою тривимірного друку на міцність з використанням програмного середовища Solidworks Simulation. *Технічна творчість* : зб. наук. праць. Хмельницький : ХНУ, 2023. № 7. С. 45-48. <http://surl.li/qrsiq>.

*Особистий внесок здобувача: Створено модель шнека в програмному середовищі Solidworks Simulation та проведено дослідження на міцність.*

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	25
ВСТУП .....	27
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ ТРИВИМІРНОГО ДРУКУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТА ВИРОБІВ .....	36
1.1. Аналіз способів виготовлення деталей та виробів .....	36
1.2. Огляд та аналіз 3D-принтерів для об'ємного друку. Обґрунтування типу обладнання тривимірного друку для виготовлення виробів і деталей легкої промисловості .....	39
1.3. Використання обладнання тривимірного друку з шнековою екструзією в різних сферах та галузях промисловості .....	45
1.4. Огляд та аналіз екструзійних головок, що використовуються в 3D- принтерах .....	52
1.5. Аналіз полімерних матеріалів та композиційних сумішей на їх основі, що застосовуються в 3D-друці. Вибір пластиків для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості.....	57
1.6. Аналіз полімерних відходів для використання в якості вихідної сировини у 3D-друці та способів і обладнання для їх подрібнення .....	61
1.7. Перспективи застосування технології тривимірного друку в легкій промисловості .....	65
1.8. Висновки до першого розділу.....	71
1.9. Задачі дослідження .....	73
РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА ОБЛАДНАННЯ ТРИВИМІРНОГО ДРУКУ .....	75
2.1. Визначення основних параметрів шнекового екструдера в зоні живлення.....	75
2.2. Визначення основних параметрів шнекового екструдера в зоні дозування.....	84

2.3. Розробка конструкцій сопел для шнекового екструдера та розрахунок їх коефіцієнту опору.....	100
2.4. Розрахунок потужності приводу шнекового екструдера .....	107
2.5. Висновки до другого розділу .....	110
<b>РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ТРИВИМІРНОГО ДРУКУ З ШНЕКОВИМ ЕКСТРУДЕРОМ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ.....</b>	<b>112</b>
3.1. Розробка моделі прототипу 3D-принтера з шнековим екструдером для переробки полімерних матеріалів.....	112
3.2. Розробка шнекового екструдера, що використовує гранули чи подрібнені відходи полімерів в якості вихідної сировини та синхронізація його роботи з обладнанням тривимірного друку .....	116
3.3. Розробка системи охолодження корпусу шнекового екструдера .....	124
3.4. Перевірка працездатності обладнання тривимірного друку з шнековим екструдером та налаштування оптимальних режимів роботи.....	141
3.5. Висновки до третього розділу.....	143
<b>РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОДРІБНЕНИХ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА ОБЛАДНАННЯ ТРИВИМІРНОГО ДРУКУ.....</b>	<b>146</b>
4.1. Експериментальне дослідження подрібнених полімерних відходів, що використовуються в якості вихідної сировини для шнекового екструдера обладнання тривимірного друку.....	146
4.2. Експериментальне дослідження об'ємної продуктивності шнекового екструдера обладнання тривимірного друку .....	157
4.3. Порівняння теоретичного та експериментального значень об'ємної продуктивності шнекового екструдера.....	173
4.4 Висновки до четвертого розділу.....	174

РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ ДЕТАЛЕЙ ТА ВИРОБІВ, СТВОРЕНИХ НА ОБЛАДНАННІ ТРИВИМІРНОГО ДРУКУ ДЛЯ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ.....	176
5.1. Експериментальне дослідження зразків, виготовлених з подрібнених полімерних відходів на обладнанні тривимірного друку зі шнековим екструдером.....	176
5.2. Шляхи використання обладнання тривимірного друку в легкій промисловості .....	191
5.3. Практичне використання обладнання тривимірного друку для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості.....	194
5.4. Висновки до п'ятого розділу .....	200
ВИСНОВКИ .....	202
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	206
ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА .....	221
ДОДАТОК Б. ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ .....	228
ДОДАТОК В. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ, ПАТЕНТИ .....	232
ДОДАТОК Г. СОПЛО ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА ТА ЙОГО ФІЗИКО- МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ.....	237
ДОДАТОК Д. ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛІМЕРІВ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ПО ЇХ ВИБОРУ ДЛЯ 3D-ДРУКУ .....	239
ДОДАТОК Е. СТУПІНЬ СТИСНЕННЯ ШНЕКА ЕКСТРУДЕРА.....	241
ДОДАТОК И. ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА.....	242
ДОДАТОК К. 3D-ПРИНТЕР ANYCUBIC MEGA S ТА ЙОГО ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ .....	248

ДОДАТОК Л. ЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУР В ТОЧКАХ ВИМІРЮВАННЯ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ SOLIDWORKS SIMULATION .....	249
ДОДАТОК М. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ ПО ВИЗНАЧЕННЮ НАСИПНОЇ ГУСТИНИ ПОДРІБНЕНИХ ЧАСТОК ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	251
ДОДАТОК Н. ДАНІ ДЛЯ ПОБУДОВИ РІВНЯНЬ РЕГРЕСІЙ .....	253
ДОДАТОК П. ВИМІРЮВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ.....	259



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ABS – акрилонітрилбутадієнстирол

FDM – Fused Deposition Modeling

FFF – Fused Filament Fabrication

PLA – полілактид

TPU – термопластичний еластомер

PET – поліетилентерефталат

PTFE – політетрафторетилен

$D_{ин.}$  – діаметр шнека

$D_{ц.вн.}$  – внутрішній діаметр матеріального циліндра

$t_{ин.}$  – крок гвинтової нарізки

$e_{г.в.}$  – ширина гребеня витка

$\delta_{заз.}$  – величина зазору між гребенем шнека та внутрішньою стінкою

матеріального циліндра

$\varphi_{г.л.}$  – кут підйому гвинтової лінії нарізки шнека

$n_{ин.}$  – частота обертання шнека

$\lambda_{зах.}$  – число заходів нарізки шнека

$P_z$  – тиск в матеріалі за напрямком осі  $z$

$P_{з.з.}$  – тиск в зоні завантаження матеріалу з бункера

$\rho_{н.г.}$  – насипна густина матеріалу

$g$  – прискорення вільного падіння

$L_{ин.з}$  – загальна довжина шнека

$h_{г.к.}$  – глибина гвинтового каналу по зонах (глибина нарізки)

$L_{з.ж.}$  – довжина зони живлення

$L_{з.п.}$  – довжина зони пластифікації

$L_{з.д.}$  – довжина зони дозування

$Q_{л.пр.}$  – лінійна продуктивність шнекового екструдера

$Q_{шн.е.}$  – об'ємна продуктивність екструдера

$S_c.$  – площа поперечного перерізу сопла

$L_{шн.кр.}$  – довжина шнека для закріплення в муфті

$i_{ст}$  – ступінь стиснення матеріалу

$L_{шн.0}$  – довжина шнеку до початку етапу стиснення матеріалу

$L_{н.ч.}$  – довжина напірної частини шнека

$A_{п.п.}$  – постійна прямого потоку

$K_{о.с.}$  – коефіцієнт опору сопла екструдера

$B_{з.п.}$  – постійна зворотного потоку

$C_{в.п.}$  – постійна потоку полімерного матеріалу, що витікає

$d_{от.}$  – діаметр вихідного отвору сопла

$N_{з.ж.}$  – потужність, що витрачається в зоні живлення на подолання сил тертя по поверхні циліндра і шнека

$N_{з.д.}$  – потужність, що витрачається на зріз полімерного матеріалу в зазорі між вершиною витка і стінкою матеріального циліндра в зоні дозування

$N_{пр.}$  – потужність приводу шнекового екструдера

$x_0$  – дійсне значення вимірюваної величини

$x_{вим.}$  – виміряне значення величини

$\Delta_x$  – відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини

$d_1, d_2, d_3$  – розмір часток у фракціях суміші

$X_1, X_2, X_3$  – кількісний вміст фракцій у суміші

$b_0, b_1, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$  – коефіцієнти рівняння регресії

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** На сучасному етапі зростає попит на обладнання, яке реалізує інноваційні технології в області тривимірного друку, особливо в легкій промисловості, яка включає швейне та взуттєве виробництво. Адитивні технології набувають все більшого розповсюдження у виробничих процесах різних галузей промисловості. Вони забезпечують скорочення витрат, прискорення виготовлення нових виробів, гнучкість підприємства тощо. Застосування шнекових екструдерів в обладнанні тривимірного друку, які використовують в якості вихідної сировини вторинні полімерні матеріали, створює нові можливості для зниження витрат на сировину та вирішення питання їх утилізації. Тема дослідження є актуальною, оскільки на сьогодні підприємства легкої промисловості потребують удосконалення та оптимізації виробничих процесів за рахунок впровадження новітнього обладнання та технологій, здатних вирішити цілу низку проблем, які є ключовим фактором успіху, зокрема, підвищення якості та конкурентоспроможності готової продукції. Тому будь-які дослідження у зазначеному напрямку мають значний потенціал для внесення важливого вкладу у технологічний розвиток та інновації в легкій промисловості.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Один із розділів роботи виконаний у рамках договору про творчу співдружність між ПП «Кредо» та Хмельницьким національним університетом: «Розробка обладнання для рециклінгу полімерних відходів взуттєвого виробництва» (№ 02-2021ТС, номер державної реєстрації 0121U110126), 2021-2024 р.р.

### **Мета і завдання дослідження.**

*Об'єктом дослідження* є процеси тривимірного друку при виготовленні деталей та виробів легкої промисловості.

*Предметом дослідження* є шнековий екструдер обладнання

тривимірного друку для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості.

*Метою дисертаційної роботи є удосконалення обладнання тривимірного друку за рахунок встановлення шнекового екструдера, що використовує гранули чи подрібнені відходи полімерів в якості вихідної сировини для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості.*

**Задачі дослідження** формулюються в роботі наступним чином:

1. Удосконалити узагальнену класифікацію 3D-принтерів, провести аналіз екструзійних систем подачі полімерного матеріалу та обладнання в якому вони використовуються, здійснити вибір екструдера для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості.

2. Аналітично дослідити основні параметри бункера, шнека, сопла та визначити об'ємну продуктивність, тиск в зонах живлення і дозування шнекового екструдера з метою встановлення його споживаної потужності.

3. Провести аналіз існуючих конструкцій сопел, що застосовуються в 3D-принтерах, їх характеристик та сумісності з шнековим екструдером на основі чого розробити нові конструкції насадок.

4. Розробити шнековий екструдер, що використовує гранули чи подрібнені відходи полімеру в якості вихідної сировини та синхронізувати його роботу з обладнанням тривимірного друку.

5. Розробити ефективну систему охолодження екструдера обладнання тривимірного друку, що запобігає перегріву полімерного матеріалу в завантажувальному бункері та підтримує стабільність процесу виготовлення деталей і виробів легкої промисловості.

6. Здійснити експериментальне дослідження подрібнених полімерних відходів, які використовуються як вихідна сировина для шнекового екструдера обладнання тривимірного друку з метою визначення їх фізико-механічних характеристик та отримати регресійні рівняння, що описують залежність насипної густини матеріалу від діаметру подрібнених часток полімеру.

7. Експериментально визначити об'ємну продуктивність шнекового

екструдера обладнання тривимірного друку та на основі цього отримати регресійні моделі, що пов'язують продуктивність пристрою з діаметром подрібнених часток полімеру, частотою обертання шнека та температурою їх плавлення.

8. Здійснити експериментальне дослідження фізико-механічних характеристик зразків, надрукованих на обладнанні тривимірного друку зі шнековим екструдером із гранул та подрібнених відходів полімерів та надати рекомендації щодо його практичного використання для виготовлення деталей і виробів легкої промисловості.

**Методи дослідження.** Визначені в роботі проблеми та задачі розв'язано із застосуванням: основних положень фізики і механіки полімерів, теорії математичного моделювання, теорії переробки полімерних матеріалів, механіки твердого тіла, математичної статистики та теорії планування експерименту; програмного середовища SolidWorks Simulation, математичного пакету Mathcad та пакету Microsoft Excel; сучасної вимірювальної та комп'ютерної техніки.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

– вперше експериментально отримано регресійні рівняння, що враховують залежність об'ємної продуктивності шнекового екструдера від основних параметрів: діаметра подрібнених полімерних відходів, частоти обертання шнеку та температури плавлення полімеру для двох видів пластиків – ABS та TPU, що дає змогу оптимізувати процес виготовлення деталей та виробів легкої промисловості;

– отримав подальший розвиток аналітичний метод визначення основних параметрів шнекового екструдера обладнання тривимірного друку, який включає розрахунок коефіцієнта опору сопел, об'ємної продуктивності, тиску в шнековому каналі, потужності приводу, що дає можливість оптимізації конструктивних елементів екструзійного устаткування;

– розроблено нову систему охолодження шнекового екструдера обладнання тривимірного друку з використанням теплового бар'єру і повітряного обдуву та досліджено у програмному середовищі SolidWorks

Simulation розподіл температур в різних його зонах, що запобігає перегріву полімерного матеріалу в завантажувальному бункері та підтримує стабільність процесу виготовлення деталей і виробів;

– експериментально здійснено дослідження характеристик подрібнених полімерних відходів, як вихідної сировини для шнекового екструдера обладнання тривимірного друку, та побудовано регресійну модель залежності насипної густини від діаметра часток, які є важливими для розрахунку тиску в зоні живлення екструдера.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Практичне значення одержаних результатів полягає у використанні удосконаленого обладнання тривимірного друку на підприємствах легкої промисловості та на фірмах, що спеціалізуються на продажі та сервісному обслуговуванні швейного устаткування. Воно дозволяє ефективно вирішувати задачі швидкого виготовлення окремих елементів та відновних деталей. Використання вторинної сировини у тривимірному друці сприяє зниженню виробничих витрат, відкриваючи нові перспективи для сталого розвитку легкої промисловості.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені на ПМП «Вітнел», ПП «КМ-Поділля», ТОВ «Спарк-Швейне обладнання», а також в освітньому процесі Хмельницького національного університету на кафедрі машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем для спеціальності 133 Галузеве машинобудування, зокрема при вивченні дисциплін «Сучасні 3D-технології виробництва», «Сучасні технології та обладнання виробництв галузі».

Акти про впровадження результатів дисертаційної роботи наведено у додатку В.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати дисертації, що виносяться на захист, особисто належать здобувачу. Постановка задачі, формулювання завдань досліджень роботи та аналіз отриманих результатів виконано спільно з науковим керівником.

В роботах, опублікованих не одноосібно автором, отримано наступні результати: [1] – Запропоновано та розроблено метод проєктування шнека екструдера обладнання тривимірного друку; [2] – Запропоновано та розроблено нові конструкції сопел шнекового екструдера обладнання тривимірного друку, що використовує гранули чи подрібнені частки полімеру в якості вихідної сировини; [6] – Виготовлено експериментальні зразки методом 3D-друку з гранул термопластичного поліуретану та термоеластопласту та досліджено їх механічні характеристики; [7] – Запропоновано методику експериментальних досліджень. Розроблено вимірювальне обладнання, здійснено дослідження зразків та визначено їх фізико-механічні характеристики; [9] – Здійснено моделювання шнекового екструдера в зоні живлення, що дало змогу визначити продуктивність та тиск у шнековому каналі; [10] – Описано перспективи та напрямки застосування 3D-друку при виготовленні деталей для обладнання легкої промисловості; [11] – Складено таблиці з основними технічними характеристиками 3D-філаментів та рекомендаціями по їх використанню для виготовлення деталей та виробів; [12] – Запропоновано конструкцію та розроблено 3D-принтер з FDM-технологією для встановлення шнекового екструдера, що використовує полімерні гранули в якості вихідної сировини; [13] – Вибрано та описано прототип «Черв'ячний екструдер для полімерних матеріалів», що є найбільш близьким до екструдера для перероблення полімерних матеріалів, який патентується; [14] – Запропоновано ідею використання екструдера для 3D-друку в роботі-маніпуляторі; [15] – Запропоновано конструктивну схему шнекового екструдера; [16] – Запропоновано технологію переробки полімерних матеріалів легкої промисловості у готові вироби з використанням адитивних технологій; [17] – Описано можливості використання 3D-друку для виготовлення та оздоблення деталей одягу; [18] – Запропоновано шляхи переробки відходів поліетилентерефталату на витратні матеріали для 3D-принтерів; [19] – Запропоновано роторно-ножову дробарку для подрібнення порожнистої тонкостінної тари PET, устаткування для переробки полімерних відходів

швейної та взуттєвої промисловості, а також обладнання тривимірного друку для їх переробки; [20] – Розроблено шнековий екструдер, що друкує подрібненими полімерними матеріалами, отриманими із відходів швейного та взуттєвого виробництва; [21] – Запропоновано технологію переробки «rPET» тари у готові вироби з використанням 3D-принтера; [22] – Удосконалено конструкцію 3D-принтера для друку композиційними сумішами, що вміщують металеві частки, здійснено друк зразків та проведено експериментальні дослідження їх фізико-механічних характеристик; [23] – Запропоновано технологію переробки відходів поліестеру на готову продукцію з використанням обладнання тривимірного друку та здійснено експериментальні дослідження; [24] – Розроблено модель в SolidWorks та виготовлено екструдер, який друкує композиційними сумішами полімерних матеріалів та металевих часток; [25] – Підбрано установку для подрібнення відходів лавсану та нейлону, що будуть використовуватися в якості вихідної сировини шнекового екструдера обладнання тривимірного друку; [26] – Запропоновано технологію переробки полімерних відходів поліестеру та нейлону в готову продукцію за допомогою пристрою тривимірного друку. Проведено експериментальні дослідження з використанням екструзійної машини; [27] – Встановлено фактори, що впливають на нагрівання корпусу екструдера обладнання тривимірного друку; [29] – Розроблено пристрій для переробки PET пляшок у вихідну сировину екструдера обладнання тривимірного друку; [30] – Описано постановку проблеми та зроблено аналіз досліджень та публікацій по застосуванню технології 3D-друку у взуттєвій промисловості; [31] – Описано металеві наповнювачі та зв'язуючі полімерні матеріали для 3D-принтерів, що друкують композитною сумішшю для створення деталей та виробів; [32] – Запропоновано модель шнекового екструдера для 3D-принтера, що друкує композиційними сумішами; [33] – Запропоновано ідею впровадження 3D-друку в навчальний процес та виготовлено 3D-принтер Prusa Mendel i2 за проектом RepRap; [34] – Описано сучасні CAE-системи для аналізу міцності виготовлених на 3D-принтері деталей; [35] – Запропоновано FDM-технологію



виготовлення виробів та деталей для військових та цивільного населення України з використанням 3D-принтера, що працює на гранулах або подрібнених відходах полімерних матеріалів; [36] – Обґрунтовано геометрію шнека для шнекового екструдера 3D-принтера, що друкує гранулами або частками полімерних матеріалів; [37] – Проведено експериментальні дослідження з визначення насипної маси подрібнених полімерних відходів; [38] – Створено модель шнека в програмному середовищі Solidworks Simulation та проведено дослідження на міцність.

Список наукових публікацій за результатами дисертаційної роботи представлено у Додатку А.

**Апробація результатів дисертації.** Апробацію основних положень, ідей, висновків дисертаційної роботи проведено на науковому семінарі кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем у Хмельницькому національному університеті. Наукові результати роботи доповідалися на: IV Всеукраїнській науково-практичній конференції «Приладобудування та метрологія: Сучасні проблеми, тенденції розвитку» (29-30 жовтня 2020р.). м.Луцьк, Україна; XX Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання» (28-29 квітня 2021р.). м.Київ, Україна; VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування» (25-28 травня 2021р.). Луцьк, Україна; Міжнародній конференції «IX Українсько-польські наукові діалоги» (20-23 жовтня 2021р.). Хмельницький, Україна; V Міжнародній науково-практичній конференції «Мехатронні системи: інновації та інжиніринг» (4 листопада 2021р.). м.Київ, Україна; International Conference on Technics, Technologies and Education ICTTE 2021. (November 3-5, 2021). Yambol, Bulgaria; International Scientific MTS Conference (June 12-15, 2022). Gliwice, Poland; Міжнародній науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Сучасні тенденції розвитку інженерії, технологій та транспорту» (18-19 жовтня 2022р.). м.Хмельницький, Україна; VI Міжнародній

науково-практичній конференції «Мехатронні системи: інновації та інжиніринг» (24 листопада 2022р.). м.Київ, Україна; International Students Scientific Conference (27th January 2023) Gliwice, Poland; XIII Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (25-26 травня 2023р.). м. Чернігів, Україна; IX Міжнародній науково–практичній конференції «Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування» (TERMM-2023) (30 травня – 1 червня 2023р.). Луцьк, Україна; III Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2023» (01–03 червня 2023р.). Вінниця, Україна; International Students Scientific Conference TalentDetector2023\_Summer (26th June 2023). Brenna, Poland; Міжнародному симпозиумі «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (SIEMA' 2023) (26-27 жовтня 2023р.) м.Харків, Україна; Міжнародній науково-практичній Інтернет-конференції молодих вчених та студентів «Ресурсозберігаючі технології легкої, текстильної і харчової промисловості» (22 листопада 2023р.). м.Хмельницький, Україна; VII Міжнародній науково-практичній конференції «Мехатронні системи: Інновації та інжиніринг» (23 листопада 2023р.). Київ, Україна; VI Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування» (21-22 грудня 2023р.). Полтава, Україна.

Відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи наведено в додатку Б.

**Публікації.** За результатами проведених досліджень основні наукові результати опубліковано у 38 публікаціях, з яких 13 наукових статей у фахових наукових журналах України, 2 статті індексовані у наукометричній базі Scopus, 1 патент України на корисну модель. Апробація засвідчена публікаціями 16 праць в матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, п'яти розділів, висновку,

списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи містить 262 сторінки друкованого тексту, з них анотація – на 19 стор., зміст – на 4 стор., перелік умовних скорочень – на 2 стор., основний текст – на 179 стор., список із 128 використаних джерел – на 15 стор., додатки – на 42 стор. Дисертація містить 134 рисунки та 12 таблиць.

## РОЗДІЛ 1.

### АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ ТРИВИМІРНОГО ДРУКУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТА ВИРОБІВ

#### 1.1. Аналіз способів виготовлення деталей та виробів

Актуальні економічні умови чітко підкреслюють, що машинобудівна галузь становить фундаментальну основу розвитку будь-якої держави, оскільки відіграє ключову роль у прискоренні технологічного та наукового розвитку. Ця галузь надає необхідне устаткування для інших секторів економіки, зокрема і для легкої промисловості, сприяючи тим самим їхньому оновленню та збільшенню капітальних активів. Окрім цього, машинобудівний сектор є одним з лідируючих за обсягом виробництва, інвестиційною привабливістю та кількістю працівників, займаючи провідні позиції в структурі світової промисловості [1].

Світовий промисловий ринок рухається під впливом технологічних нововведень у машинобудівній галузі та прогресу в управлінні виробничими процесами. Виробничі підприємства інтенсифікують зусилля з метою розширення виготовлення високотехнологічного обладнання, інтегруючи останні технологічні досягнення. Машинобудування відіграє ключову роль у розвитку інших секторів економіки, надаючи необхідне устаткування та технології, що варіюються від виробництва споживчих товарів до спеціалізованого обладнання. Це включає забезпечення обладнанням галузей, таких як: гірничодобувна промисловість, легка промисловість, енергетика, аграрний сектор, медицина, будівельна індустрія тощо [2, 3].

Основною задачею галузевого машинобудування є створення новітнього устаткування. Розробка такого обладнання є актуальною задачею, оскільки вона стимулює технологічний розвиток та інноваційні процеси в промисловості. Це дозволяє компаніям підвищувати ефективність виробництва,

знижувати витрати та оптимізувати робочі процеси. Оновлення технічного парку допомагає впроваджувати передові методи виробництва, зокрема автоматизацію та роботизацію, що є ключовими факторами у забезпеченні конкурентоспроможності на глобальному ринку.

Багато в чому ефективність новітнього обладнання залежить від способів його виготовлення, оскільки кожен аспект процесу виробництва впливає на якість, надійність та ефективність кінцевого продукту. Використання передових технологій і матеріалів у процесі виготовлення обладнання забезпечує високу точність, тривалий термін служби та оптимальну його продуктивність обладнання. Сучасні способи виготовлення обладнання мають вирішальне значення для його загальної ефективності та конкурентоспроможності на ринку. Підходи до виробництва, які орієнтовані на інноваціях, якості та сталості, є ключовими у створенні високоефективного та надійного обладнання [4, 5].

На сьогоднішній день існують різні способи виготовлення виробів та деталей. Виконаний аналіз технічної літератури [6-9], дозволив класифікувати їх, розділивши на три групи. Класифікація способів виготовлення виробів та деталей представлена на рисунку 1.1 [10].

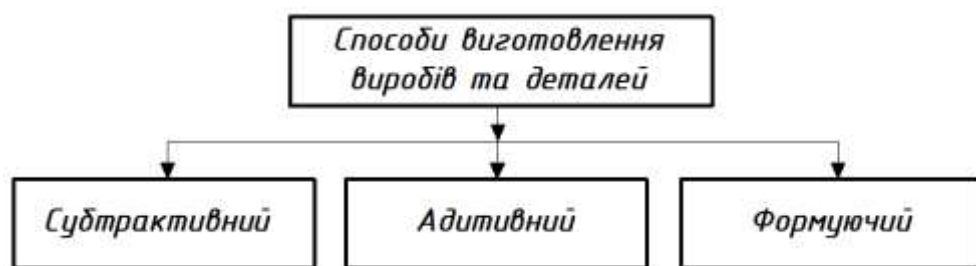


Рисунок 1.1 - Класифікація способів виготовлення виробів і деталей

Субтрактивний, адитивний та формуючий методи виробництва представляють собою різні підходи до створення фізичних об'єктів. Кожен з них має свої особливості та застосування.

Метод субтрактивного виробництва передбачає видалення матеріалу із заготовки для отримання потрібної форми. Типові приклади субтрактивного

виробництва включають фрезерування, токарну обробку, свердління, шліфування та інші види механічної обробки. Перевага цього методу полягає у високій точності та якості поверхні, що обробляється. Він також часто супроводжується значними відходами матеріалу та певними обмеженнями у складності форми готового виробу.

Метод адитивного виробництва (3D-друк) полягає в послідовному накладанні матеріалу шар за шаром для створення об'єкта. Він, зазвичай, використовує пластик, метал, кераміку або інші матеріали у вигляді порошку, смоли, ниток тощо. Адитивне виробництво дозволяє створювати складні геометричні форми з високою ступеню індивідуалізації, що є недосяжним для традиційних методів. Проте цей метод може мати обмеження щодо якості поверхні та механічних властивостей готових виробів.

Метод формуючого виготовлення виробів включає створення об'єктів шляхом впливу робочого інструменту на матеріал у м'якому або рідкому стані для його формування в потрібну конфігурацію. Формуючі методи включають лиття під тиском, вакуумне формування, лиття з використанням форм, екструзію тощо. Ці методи дозволяють здійснювати масове виробництво виробів із стабільними розмірами та властивостями. Однак вони часто вимагають значних витрат на виготовлення прес-форм та обмежують можливості їх зміни без додаткових затрат.

При субтрактивному виробництві виникає більша кількість відходів, ніж при адитивному. Проте при адитивному виробництві, в процесі виготовлення виробів за допомогою 3D-друку також утворюються полімерні відходи. Основними типами полімерних відходів, що виникають при цьому процесі, можуть виступати: невдало надруковані деталі через неправильну форму чи друк з дефектами; підтримуючі структури, які необхідні для стабілізації деталей під час друку та які в подальшому видаляються; підложки та краї першого шару, необхідні для виключення деформації та відлипання деталі від платформи 3D-принтера тощо. Відходи пластику ABS, що утворюються в процесі 3D-друку деталей та виробів приведені на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 - Відходи пластику ABS, що утворюються під час 3D-друку [10]

Для розробки пристрою тривимірного друку для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості, галузевого машинобудування з гранул чи подрібнених відходів було вибрано адитивний спосіб виготовлення виробів та деталей.

1.2. Огляд та аналіз 3D-принтерів для об'ємного друку. Обґрунтування типу обладнання тривимірного друку для виготовлення виробів і деталей легкої промисловості

Адитивні технології є важливою частиною нової промислової революції. Вони відрізняються швидким розвитком і широким спектром застосувань. Ці технології, зокрема 3D-друк, надають можливість створювати об'єкти шляхом послідовного нанесення шарів полімерного матеріалу, використовуючи при цьому різноманітні методи. Це сприяє виготовленню складних форм за короткий проміжок часу [11-15]. Завдяки зазначеним технологіям відкриваються нові перспективи в різних галузях, зокрема: машинобудуванні, медицині, будівництві тощо. Вибір відповідного типу обладнання тривимірного друку та матеріалу залежить від конкретних завдань і потребує глибокого розуміння можливостей та обмежень їх застосувань.

В роботі [16] всі існуючі принтери для об'ємного друку класифікуються за: технологією друку (I); видом витратного матеріалу (II); призначенням (III); сферою використання (IV); віссю руху екструдера і робочого столу

(платформи) (V) та різновидами (VI). Запропоновано удосконалити представлену класифікацію новою групою 3D-пристроїв, що поділяються за екструзійним осадженням (VII).

У кожній групі представлено багато різних підвидів, які мають свої особливості. До основних технологій друку (I) відносяться струменева та лазерна. Струменева технологія передбачає нагрівання матеріалу та дозовану його подачу. В більшості випадків це термопластичний полімер, наприклад, ABS. Лазерна технологія базується на лазерному спіканні або плавленні порошку. Вона дозволяє використовувати різноманітні матеріали, включаючи метали. Це розширює можливості виготовлення деталей складної геометричної форми.

Розподіл за типом витратного матеріалу (II). В основі цієї класифікації лежить тип витратного матеріалу, який використовує 3D-принтер. За типом матеріалу пристрої розділяються на: порошкові; фотополімерні; струменеві FDM (Fused Deposition Modeling); для друку полімерними гранулами або подрібненими відходами пластиків [13].

Всі 3D-принтери, незалежно від технології, що застосовується для об'ємного друку і витратного матеріалу, можна розділити на основні групи за призначенням (III): споживчі, професійні, персональні і виробничі.

З кожним роком 3D-пристрої стають досконалішими та популярнішими. Вони перетворюються з вузько-направлених та вартісних систем на невід'ємну частину професійних засобів у різних галузях промисловості. Сфера їх використання (IV) на сьогоднішній день досить широка від медицини, будівельної галузі, мистецтва, ювелірної справи до автомобільної промисловості та архітектури [17]. Завдяки доступності тривимірного друку відкриваються нові можливості для інновацій у сферах легкої промисловості та галузевого машинобудування [18-20]. Пропонується також розширити сферу використання 3D-принтерів у класифікації, представленій в роботі [16] крім освіти ще і в науці.

До V групи відносяться 3D-принтери, які розподілені за способом



переміщення екструдера та платформи [21]. Виріб формується за допомогою поступового додавання пластичного матеріалу на робочу платформу. 3D-принтер має раму і механізми переміщення за трьома осями: X (вліво-вправо), Y (вперед-назад) і вісь Z (вгору-вниз). Екструдер з розплавленим матеріалом розташований на вісі X, а керування здійснюється контролером.

До групи різновидів (VI) можна віднести принтери, які: видавлюють чи розпилюють матеріал [22]; спікають чи склеюють матеріал; друкують гранулами чи подрібненими відходами пластиків.

Більш детально зупинимося на принтері для друку гранулами чи подрібненими відходами пластиків. Такий пристрій – це новий тип обладнання, яке ще знаходиться на стадії розробки. У процесі роботи ці системи використовують ту ж саму технологію, яка використовується при FDM-друці, суть якої полягає в тому, що матеріал розплавляється і видавлюється через сопло з шнекового екструдера.

Ця тривимірна технологія використовує подрібнені відходи чи гранули полімерного матеріалу замість готового філаменту, подаючи матеріал через бункер у нагрівальну зону екструдера для розплавлення і подальшої екструзії. Застосування гранул є оптимальним через їх меншу схильність до утворення пробок і кращу пластифікацію. Такий підхід дозволяє швидко створювати деталі і виробити із вторинної сировини, зменшуючи витрати у порівнянні з виготовленням філаментів, що є більш витратним і тривалим процесом.

Існує дві технології виготовлення філаменту для 3D-друку деталей: з полімерних гранул, виготовлених в промислових умовах на обладнанні для екструзії та з подрібнених полімерних відходів, наприклад, з тих, що були отримані при 3D-друці деталей.

Виготовлення полімерного прутка для тривимірного друку традиційним способом передбачає множинне нагрівання матеріалу, що починається від виготовлення гранул до створення готової деталі. Неодноразове нагрівання призводить до хімічних та термічних змін у пластику, погіршуючи його властивості. Проте застосування 3D-обладнання з шнековими екструдерами, які

використовують в якості вихідної сировини безпосередньо гранули чи подрібнені відходи полімерів, знижує кількість етапів нагрівання. Це не тільки зберігає первинні властивості полімерного матеріалу, але й виключає потребу виготовлення філаментів, спрощуючи виробничий процес та збільшуючи ефективність використання пластику. Крім того, вторинна переробка полімерних матеріалів дає змогу створювати матеріали із заданими властивостями завдяки додаванню до його складу додаткових компонентів, наприклад, таких як, пластифікатори чи барвники. Це робить технологію тривимірного друку більш гнучкою та економічно вигідною.

Метод екструзійного осадження матеріалу в адитивному виробництві продовжує розвиватися. На сьогодні він пропонує більшу ефективність, гнучкість та якість для широкого спектра застосувань. Для того, щоб розробити ефективну, працездатну конструкцію екструдера обладнання тривимірного друку деталей та виробів легкої промисловості, в першу чергу необхідно дослідити процес шнекової екструзії.

Процеси адитивного виробництва на основі екструзії (VII) класифікуються відповідно до методу екструзії, що використовується: на основі плунжера або поршня; на основі прутка (філаменту) та на основі шнека (рис.1.3) [23-25].

При плунжерному методі (Piston Extrusion) матеріал (в більшості випадків глина або інша пастоподібна субстанція) поміщається у відсік, з якого він витісняється через сопло певного діаметру під тиском поршня (рис.1.3, а). Такий метод знайшов використання, наприклад, для виробництва керамічних деталей у промисловості або в мистецтві. Він дозволяє здійснювати контроль кількості матеріалу, що витісняється, і є ефективним для матеріалів, які мають високу в'язкість.

Одним з найпоширеніших методів 3D-друку, як вже відмічалось раніше, є метод FFF (Fused Filament Fabrication) з використанням філаменту (рис.1.3, б). Принцип роботи такого устаткування був також описаний. Такий метод підходить для значної кількості видів пластику, включаючи PLA, ABS, TPU та інші [26].

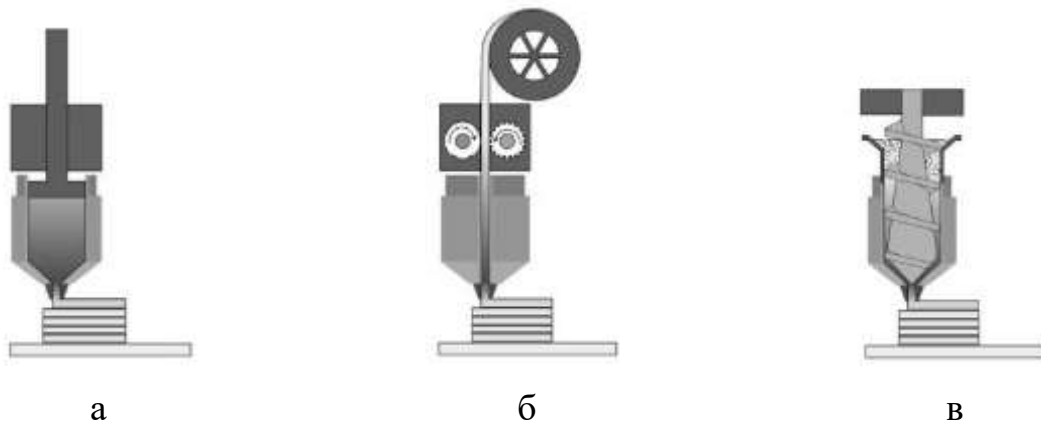


Рисунок 1.3 – Методи екструзії на основі: *а* - плунжера; *б* – філаменту;  
*в* – шнека [24]

При шнековому методі (Screw Extrusion) застосовується черв'як для подачі матеріалу через сопло (рис.1.3, в). Шнеки часто використовуються в промислових 3D-принтерах для обробки великої кількості матеріалу, включаючи високов'язкі та композиційні матеріали. Обертовий черв'як (рис.1.3, в) застосовується з метою забезпечення безперервної подачі матеріалу в камеру екструдера та створення в ній достатньо високого тиску. Це, в свою чергу, збільшує швидкість та роздільну здатність тривимірного друку в порівнянні з виготовленням виробів методом FDM наплавлення (рис.1.3, б) та процесами 3D-друку на основі поршня (рис.1.3, а). Екструзія з обертовим шнеком забезпечує кращий контроль над потоком полімеру і дозволяє більш точно дозувати його кількість, порівняно з екструзією з використанням філаменту. Крім того, обертовий рух шнеку розширює змішувальні можливості системи, тим самим покращуючи однорідність матеріалу, що екструдуються. Отже, це дає змогу переробляти більш широкий спектр полімерної сировини, а також використовувати вторинну сировину під час екструзії.

Кожен з приведених та розглянутих методів екструзійного адитивного виробництва має свої переваги та обмеження і може бути вибраний в залежності від матеріалу, який потрібно переробити та вимог до кінцевого продукту.

На основі проведеного огляду та аналізу існуючих видів принтерів для

об'ємного друку та класифікації, наведеної в роботі [16] була удосконалена узагальнена їх класифікація, що приведена на рисунку 1.4.

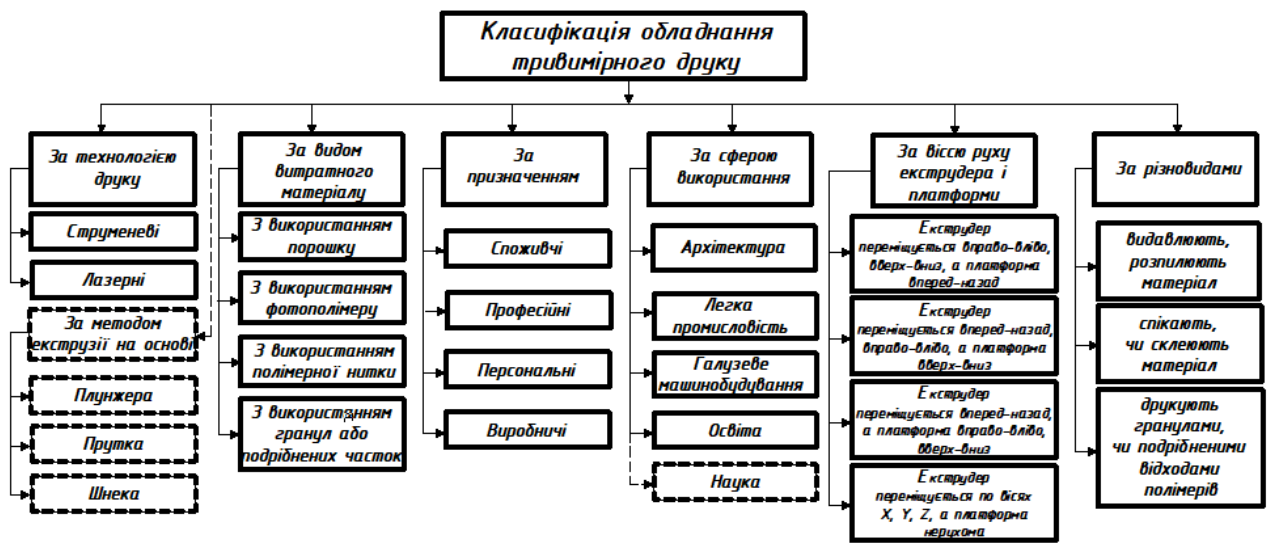


Рисунок 1.4 – Узагальнена класифікація обладнання тривимірного друку

Завдяки розробленій узагальненій класифікації можна побачити, що існує значна кількість різновидів обладнання для об'ємного друку. Це дає можливість підібрати саме ту модель, яка необхідна для виконання конкретних завдань. Незважаючи на практично безмежні можливості промислових пристроїв, найбільш масовими залишаються 3D-принтери струменевого типу, що використовують полімер у вигляді прутка, гранул чи подрібнених відходів пластику в якості вихідної сировини.

Філамент залишається основним матеріалом для більшості тих, хто використовує FDM 3D-друк [26]. Проте нитка не є єдиним витратним матеріалом для тривимірного друку. Їй на заміну, як вже відмічалось, приходять гранули або подрібнені частки пластиків як альтернативні матеріали. На перший погляд, застосування гранул може видатися кроком назад, адже прутки спеціально створювалися для спрощення 3D-друку. Проте виробництво полімерної нитки з гранул збільшує вартість як витратного матеріалу, так і самого друку порівняно з використанням гранул чи подрібнених полімерних часток.

Перевагами 3D-друку гранулами чи подрібненими відходами полімерів є нижча вартість та можливість використовувати широку гаму матеріалів для створення деталей та виробів у різних галузях.

Однак 3D-друк на основі гранул чи подрібнених відходів пластику на сьогодні впроваджується повільно через обмежену кількість принтерів, здатних працювати з такими матеріалами. Тому питання розробки шнекового екструдера для 3D-принтера, здатного використовувати гранули чи подрібнені відходи пластиків, є актуальною задачею.

На основі класифікації (рис.1.4) та наведеного обґрунтування для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості методом тривимірного друку було вибрано пристрій, що працює за технологією FDM з наступними характеристиками: технологія друку - струменева; вид витратного матеріалу - гранули або подрібнені відходи полімеру; призначення - споживче; вісь руху екструдера та платформи - екструдер переміщується вправо - вліво, вгору - вниз, а платформа вперед - назад; екструзійне осадження - шнекове.

### 1.3. Використання обладнання тривимірного друку з шнековою екструзією в різних сферах та галузях промисловості

Для того, щоб розробити ефективну конструкцію обладнання тривимірного друку, що використовує гранули чи подрібнені відходи полімерів в якості вихідної сировини, необхідно провести огляд патентів та технічної літератури. Огляд допоможе ознайомитися з останніми розробками та інноваціями в цьому напрямку, визначити їх можливості та оцінити проблеми, які можуть виникнути під час розробки пристрою.

Було проведено пошук поданих розробок в цьому напрямку на видачу патентів України на винаходи (корисні моделі) в спеціалізованій базі даних «Винаходи (корисні моделі) в Україні» Державної організації «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій» УКРНОІВІ, що охоплює 2016-2023 роки [27]. Результати введення ключових слів наступні:

«3D-принтер» - 26 документів; «3D-друк» - 29; «3D-друк полімерними гранулами» - 0; «3D-друк полімерними відходами» - 0; «шнекова екструзія» - 0.

Для пошуку патентної інформації були використані світові патентні системи: USPTO з повними текстами патентів від 1976 року і зображеннями з 1790 р. [28]; WIPO PATENTSCOPE з доступом до більше 115 мільйонів міжнародних і національних документів [29]; Espacenet від Європейського патентного відомства з більше ніж 140 мільйонами документів [30]; The Lens для пошуку в понад 150 мільйонах документів з детальною класифікацією [31]; та Google Patents, індексуючи понад 18 мільйонів документів від ведучих патентних відомств, таких як: USPTO, ЕРО, JPO, КРО, WIPO та CNIPA [32].

Ці ресурси дозволили провести ефективний пошук патентів, використовуючи ключові слова з напрямку розробки і досліджень дисертаційної роботи та надали можливість доступу до великої кількості патентних документів з усього світу.

Для прикладу наведемо результати пошуку в патентній базі Google Patents. При введенні ключових слів «3D-printer» у патентну базу було отримано 105 результатів; «3D-printer with a screw extruder» - 64963 посилання, а при введенні більш вужчої фрази «A 3D-printer with a screw extruder that prints with granules or crushed particles of polymer» - 4710 документів [33].

Результати подачі заявок на патенти за фразою «A 3D-printer with a screw extruder that prints with granules or crushed particles of polymer» в патентні відомства різних країн, які входять в базу даних системи Google Patents за роками представлені на рисунку 1.5.

Діаграма демонструє суттєве зростання в останні роки подачі заявок на патенти з розробки 3D-принтерів зі шнековою екструзією.

Аналіз патентних баз показує, що роботи, пов'язані з розробкою 3D-принтерів з використанням гвинтової екструзії, наразі активно патентуються по всьому світу. В Україні цей напрямок практично не розвивається. Якщо розглядати в світовому масштабі, то спостерігається про зростаючий інтерес до створення та вдосконалення технологій 3D-друку, особливо процесів екструзії,

які можуть ефективно обробляти різні типи матеріалів, включаючи перероблені та більш складні полімери.

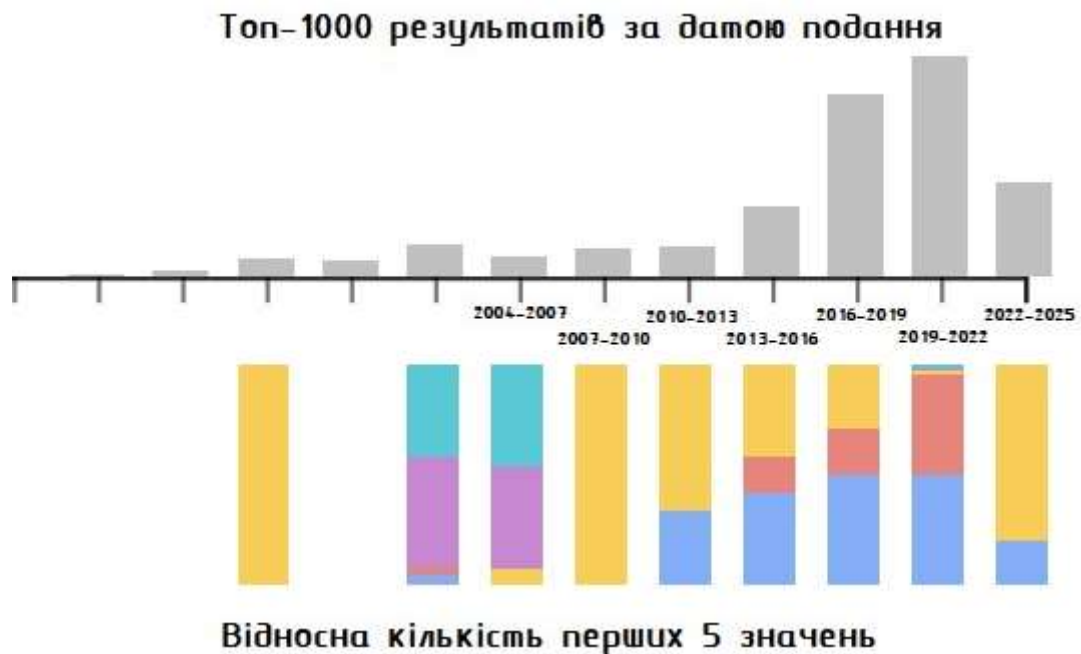


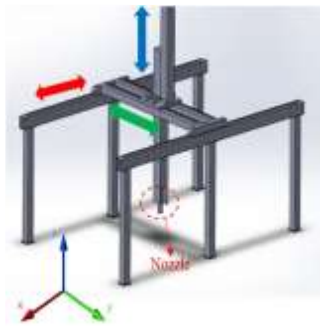
Рисунок 1.5 – Результати подачі заявок на патенти в патентні відомства різних країн від Google Patents [33]

Шнекова екструзія в 3D-друці має кілька переваг, а саме: здатність переробляти більш широкий спектр матеріалів, вищу точність у розподілі матеріалу та покращену рівномірність екструзії. Ці властивості роблять цю технологію особливо привабливою для промислового застосування та виготовлення виробів на замовлення.

Патентування в цьому напрямку відображає інноваційний розвиток і важливість 3D-друку в сучасних технологічних процесах. Це також демонструє потенціал ринку та можливість подальших досліджень і розробок у цій сфері.

Більш детально розглянемо використання обладнання тривимірного друку з шнековою екструзією в різних сферах та галузях промисловості.

У роботі [34] представлена розробка прототипу 3D-принтера для виготовлення бетонних конструкцій із цементних сумішей. Загальна конструкція 3D-принтера показана на рисунку 1.6.



а



б

Рисунок 1.6 – Загальна конструкція 3D-принтера: *а* – 3D-модель;  
*б* – фото установки

Наведений прототип був виготовлений з метою перевірки продуктивності перед розробкою повноцінної промислової моделі 3D-принтера для виготовлення бетонних конструкцій. У роботі дослідження проводилися за трьома напрямками: керування рухом екструзійної головки у 3D-просторі; визначення властивостей надрукованих об'єктів та розробка системи розподілу матеріалу.

Проведені авторами експерименти продемонстрували можливість друку бетонної конструкції за допомогою 3D-принтера.

У науковій праці [35] розроблено пристрій для тривимірного друку керамічними пастами на основі екструзії. Запропонований в роботі метод 3D-друку є ефективнішим та новим підходом для виготовлення кераміки завдяки простоті використання, низьким інвестиціям, високому використанню матеріалів і хорошій адаптованості до кількох матеріалів (рис.1.7).

Проведені авторами експерименти з 3D-друком тонкостінних конусоподібних еталонних деталей, чітко продемонстрували, що запропонований метод збереження форми не лише вдосконалив здатність формування шарів за шарами, але й уможливив цифровий контроль затвердіння екструдату. Надруковані 3D керамічні вироби зі складними профільованими поверхнями продемонстрували, що вдосконалений науковцями процес 3D-друку керамічних паст на основі екструзії має кардинальний потенціал, що перевищує можливості традиційної майстерності.



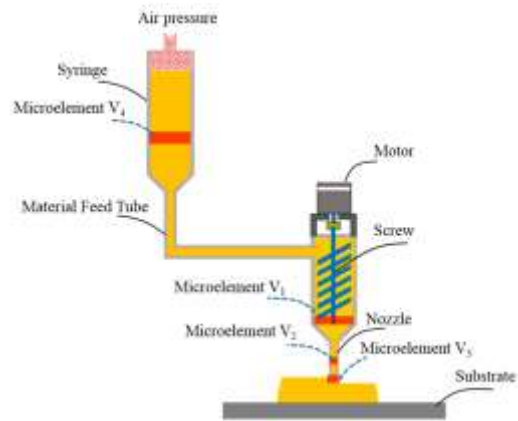


Рисунок 1.7 – Пристрій для тривимірного друку керамічними пастами на основі екструзії

У роботі [36] наведено пристрій для тривимірного друку керамічних виробів. Обладнання для 3D-друку, яке використовується в цьому дослідженні, поєднує технологію DIW (Direct Ink Writing) з технологією FDM. DIW - це метод 3D-друку, при якому використовуються пасти для створення об'єктів. В цьому випадку відбувається процес витіснення суміші, яка складається з глини і води через сопло для побудови об'єкта шар за шаром. Пристрій для виготовлення виробів з глиняної суміші зображено на рисунку 1.8.

Проведені науковцями експериментальні дослідження дозволили встановити, що одним із найважливіших параметрів, який впливає на якість готового виробу є вихідна швидкість друку. Вона є похідною від швидкості екструзії керамічної глини.

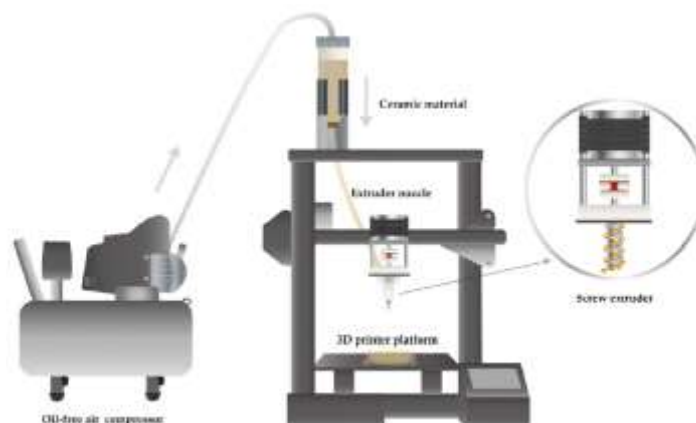


Рисунок 1.8 – Принципова схема гвинтового екструзійного обладнання прямого нанесення глиняної суміші на робочу платформу

Шнекова екструзія також знайшла застосування в фармацевтичній галузі. Автори наукової праці [37] використали технологію прямого порошкового екструзійного (DPE, Direct Powder Extrusion) тривимірного друку, щоб виготовити педіатричні 3D-друковані таблетки аморфних твердих дисперсій і поверхнево-активних речовин. Вони були успішно надруковані як з гранул, так і з порошоків, отриманих з екструдатів екструзією гарячого розплаву (HME, Hot Melt Extrusion).

Підготовлені суміші, гранули або подрібнені екструдати додавалися в бункер фармацевтичного 3D-принтера M3DIMAKER™ (FabRx Ltd., London, UK) з насадкою прямого порошкового екструдера. Використаний 3D-принтер був спеціально розроблений із прямим одношнековим екструдером подачі порошку та діаметром сопла 0,8 мм. Його конструкція заснована на одношнековій екструзії гарячого розплаву зі швидкістю обертання (екструзією), що контролюється програмним забезпеченням 3D-принтера (Repetier-Host V 2.1.3, Willich, Germany). Крім того, насадка екструдера рухається в трьох вимірах, створюючи об'єкти шар за шаром (рис.1.9).

Проведені дослідження продемонстрували можливість 3D-друку таблеток з використанням гранул або порошкових форм, отриманих HME, уникаючи використання вихідної сировини у вигляді прутка.

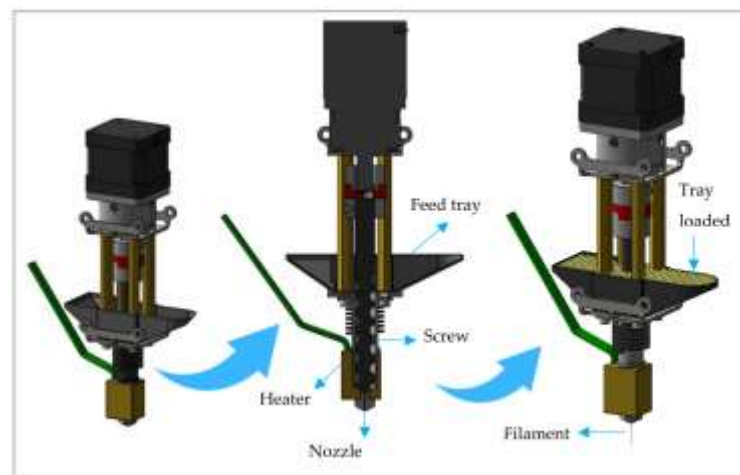


Рисунок 1.9 – Конструкція одношнекового прямого порошкового екструдера FabRx 3D-принтера M3DIMAKER™

Відоме застосування шнекової екструзії при виробництві композитних матеріалів. На основі адитивного виробництва композитів з деревного борошна та полігідроксіалканоатів авторами роботи [38, 39] була розроблена мікрошнекова екструзійна система FDM, що представлена на рисунку 1.10.

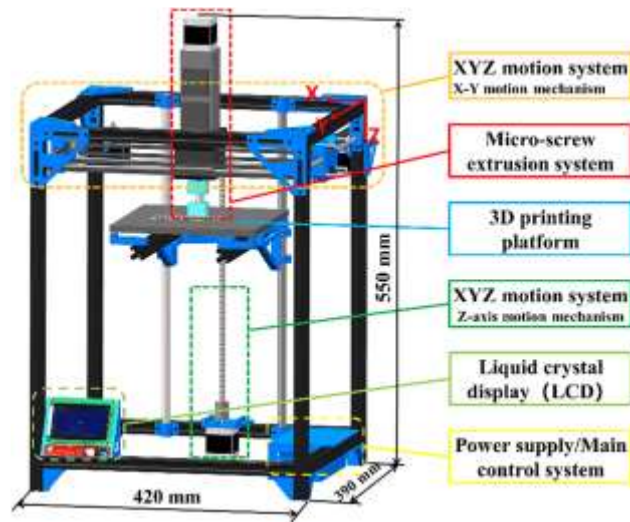


Рисунок 1.10 – Мікрошнекова екструзійна система FDM [39]

Вченими були встановлені фактори формування, що впливають на мікрошнекову екструзію адитивного виробництва, а саме: параметри шнека та діаметр сопла, а також характеристики процесу, такі як: кут нахилу, товщина шару, швидкість друку та температура сопла.

Дослідниками визначено, що ці параметри прямо чи опосередковано пов'язані зі швидкістю шнека. Встановлено лінійну залежність між швидкістю шнека та параметрами формування. Оцінено механічні та термічні властивості різних параметрів мікрогвинтової екструзії адитивного виробництва [38].

Компанія COGIT створила інноваційний 3D-принтер для високоефективних полімерів [40]. Такий принтер представлений на рисунку 1.11.

У ньому встановлено шнековий екструдер для 3D-друку COGIT AM (Additive Manufacturing), здатний переробляти високоефективні полімерні гранули, такі як PEEK, PEKK, PAEK, PEI, PPSU зі скляним чи вуглецевим волокном або без них.

Ці матеріали мають високі механічні характеристики (міцність 90 МПа -

200 МПа), що дозволяє виготовляти з них деталі складної форми для високоточних галузей, таких як: авіація, космос, оборона чи медицина. Ці високоефективні матеріали плавляться при високих температурах (343°C для PEEK), є в'язкими та дуже абразивними, особливо коли вони містять волокна. Завдяки металевій конструкції, розроблена головка COGIT може друкувати зазначеними матеріалами.



а



б



в

Рисунок 1.11 – 3D-принтер для високоефективних полімерів від компанії COGIT: *а* – загальний вигляд; *б* – шнековий екструдер; *в* – сопло з нагрівальним елементом

Проведений огляд показав суттєвий прогрес за останні п'ять років в напрямку розробки 3D-принтерів з шнековою екструзією, які використовують якості вихідної сировини гранули чи подрібнені частки.

#### 1.4. Огляд та аналіз екструзійних головок, що використовуються в 3D-принтерах

Екструзійна головка є ключовим компонентом екструзійної машини [41, 42]. Цей інструмент відіграє основну роль у формуванні кінцевої форми

екстурованих виробів [43]. Функція насадки полягає у наданні розплавленому матеріалу, що поступає з матеріального циліндра, відповідної конфігурації поперечного перерізу. Така конфігурація апроксимується до зовнішньої форми готового виробу (труба, профіль, кабельна ізоляція), або форми, яка може бути трансформована у необхідний переріз після виходу із насадки (наприклад, рукавна плівка). Розплав полімеру, що проходить через головку, зазнає поступову, а іноді й раптову зміну форми свого перетину від круглої, властивої внутрішньому діаметру матеріального циліндра, до конкретної форми, яку задає конструкція насадки.

Якість 3D-друку залежить від багатьох факторів, до яких можна віднести: кінематику принтера; якість механіки; стабільність електроніки та налаштування слайсера. Особливо важливим є сопло екструдера, яке екструдує філамент і має важливе значення в процесі 3D-друку. Його розмір, внутрішня будова, діаметр отвору та матеріал, з якого виготовлено, суттєво впливають на якість та швидкість друку [44]. Сопло з великим вихідним отвором забезпечує кращу теплопередачу, що підвищує ефективність процесу, тоді як менший діаметр дозволяє друкувати тонші шари та стінки, але при цьому знижується швидкість друку. Розмір сопла впливає на час друку та якість кінцевого продукту, при цьому часто необхідно знаходити компроміс між цими параметрами. Конструкція сопла також важлива для шнекових екструдерів 3D-принтерів, що використовують гранули або подрібнені відходи полімерного матеріалу, впливаючи на подачу розплавленого полімеру [45].

Розглянемо дві найбільш поширені конструкції сопла, які використовуються в 3D-принтерах MakerBot та Ultimaker (рис.Г.1, а, б, рис.Г.2, а, б, додаток Г) [46, 47]. Обидва досить довгі, але при цьому сопло до принтера MakerBot має ширшу площину навколо вихідного отвору.

Така особливість сопла має набагато більше значення ніж його довжина. Насадка з вузькою площиною навколо вихідного отвору зменшує небажану передачу тепла на вже створений шар полімеру, з якого друкується виріб. Це пов'язано з тим, що поверхня контакту між соплом і надрукованим шаром є меншою. Однак вузька площа є більш крихкою і при непередбаченому

зіткненні з надрукованим шаром може виникнути її деформація. Це, в свою чергу, в подальшому може відобразитися на якості друку.

Як зазначалось вище, головний недолік насадки з ширшою площиною навколо вихідного отвору полягає в тому, що вона передає тепло на вже надрукований шар. Без належного, достатнього охолодження це може негативно вплинути на весь виріб 3D-друку. Тому для використання зазначеного сопла необхідні чіткі налаштування 3D-принтера і точності позиціонування. Незначна похибка в налаштуванні процесу екструзії може призвести до наявності дефектів у надрукованій деталі.

Довжина сопла також впливає на процес екструзії. Довгі сопла найбільш зручні при чищенні, але швидше відбувається охолодження їхньої поверхні зовнішнім повітрям, ніж поверхні коротких (рис.Г.2, в, додаток Г). Тобто використання короткого сопла несуттєво, але дозволяє дещо зменшити тепловтрати. Це, в свою чергу, дає змогу більш точно визначати температуру при знятті показань з датчика, який знаходиться в нагрівальному блоці.

Внутрішня частина сопла дуже важлива, завдячуючи тому, що з нею стикається пластик під час друку. Існує небагато варіантів внутрішньої форми сопла екструдера 3D-принтера. На рисунку Г.3, а, б (додаток Г) показано в розрізі дві найбільш поширені конструкції сопла до 3D-принтерів. Іноді зустрічаються насадки спеціального призначення.

Одним з найпростіших за внутрішньою будою є сопло, що приведене на рисунку Г.3, а (додаток Г). Насадка всередині має дві проточки, основна під товщину пластику з конічним звуженням ближче до отвору виходу пластику, а також отвір. Філамент, що плавиться в циліндричній частині, проходячи через конічну, попадає у вихідний отвір та пошарово наноситься на робочу платформу. Від якості проточки залежатиме як часто забиватиметься сопло, адже при проточці поганої якості пластик постійно буде зачіплюватись за внутрішні стінки сопла і заважатиме потоку.

Недоліком такого сопла є можливість появи «павутини» з тонких ниток полімеру при друці деталі.

Вирішити цю проблему можуть сопла E3D з іншою внутрішньою

будовою та діаметром отвору від 0,2 до 1,2 мм (рис.Г.3, б, додаток Г).

Насадка всередині має три проточки, основна під товщину пластику, вихідний отвір, а між ними розміщено додатковий циліндричний канал. Основне його призначення направляти розплавлений полімер. Завдяки такій конструкції пластик рівномірно видавлюється, а не витискається в різні сторони. Так вирішується питання «павутини» при переміщенні сопла на робочій платформі. Якість 3D-друку підвищується.

Різні типи сопел E3D, включаючи насадки Volcano [47, 48] та Super Volcano [49], мають подовжену різьбову частину та спеціальний нагрівальний блок, що дозволяє швидше прогрівати полімерний матеріал та збільшувати швидкість друку. Сопло з знімним наконечником [50] є корисним для частої заміни полімеру, тоді як сопло з власним термобар'єром, виготовлене з латуні або загартованої сталі, має біметалеву конструкцію, що запобігає утворенню пробок та витіканню полімерного матеріалу. Дво і триканальні сопла використовуються для друку декількома матеріалами одночасно, потребуючи спеціального устаткування та програмного забезпечення [51]. Насадки в залежності від розмірів філаменту (1,75 мм або 3,0 мм), впливають на продуктивність тривимірного пристрою. Діаметр сопла визначає висоту шару і швидкість друку. Отвір насадки з діаметром 0,4 мм є стандартним розміром, що забезпечує оптимальний баланс (рис.Г.4, додаток Г) [52]. Більші діаметри сопел забезпечують швидше виконання операції друку та більшу стабільність готових моделей. Латунь є одним із самих популярних матеріалів для сопел, але вони швидко зношуються при використанні абразивних матеріалів (рис.Г.5, додаток Г). Нержавіюча сталь і загартована сталь мають кращу зносостійкість, але мають нижчу теплопровідність [52, 53]. Карбід вольфраму та сопла з рубіновими або сапфіровими наконечниками забезпечують високу зносостійкість і теплопровідність, але є дорогішими [53, 54].

Основні фізико-механічні властивості сопел, виготовлених з різних матеріалів представлені в таблиці Г.1 (додаток Г) [54].

На основі проведеного огляду зовнішньої та внутрішньої конструкції сопел, діаметру вихідного отвору та матеріалів з яких вони виготовляються

було розроблено їх класифікацію, що представлена на рисунку 1.12 [45].

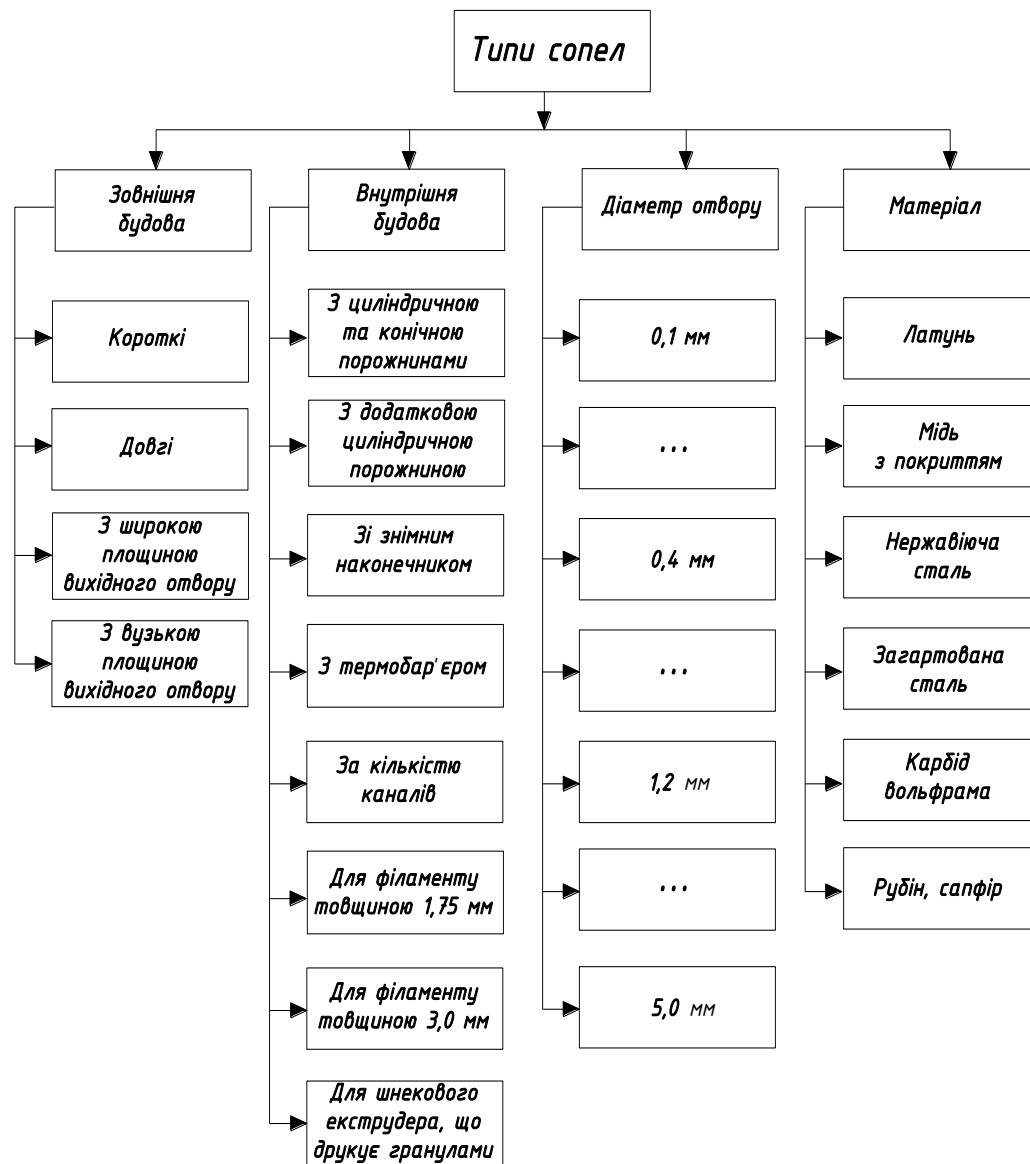


Рисунок 1.12 – Класифікація сопел для 3D-друку

В цій класифікації за внутрішньою будовою виділено сопло для екструдера 3D-принтера, що використовує гранули чи подрібнені відходи полімерного матеріалу в якості вихідної сировини та збільшено для нього діаметр вихідного отвору до 5 мм.

Аналітичний огляд насадок показав, що сопло є важливим елементом зокрема екструдера та 3D-пристою в цілому. Розуміння переваг та недоліків різних конструкцій насадок і полімерних матеріалів, що переробляються може значно покращити його продуктивність.



1.5. Аналіз полімерних матеріалів та композиційних сумішей на їх основі, що застосовуються в 3D-друці. Вибір пластиків для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості

Сучасні системи 3D-друку, відкривши нові можливості у різних сферах, стали важливим інструментом не тільки для створення прототипів, але й для виробництва кінцевих продуктів.

У технічній літературі на сьогодні недостатньо інформації про сировину, що використовується для виготовлення філаментів, оскільки більшість виробників тримають такі дані у секреті заради комерційної конфіденційності.

Це створює потребу у дослідженні властивостей вихідних матеріалів для розуміння їх впливу на 3D-друк. Розробка шнекового екструдера для 3D-обладнання, що використовує подрібнені полімерні відходи, включаючи відходи легкої промисловості та тривимірного друку, вимагає детального вивчення цих матеріалів. Аналізуючи властивості філаментів, описаних у літературі, можна зробити висновки про характеристики подрібнених полімерних відходів для ефективної роботи екструдера. Різноманіття доступних полімерних матеріалів і композитів з різними добавками дозволяє вибирати матеріал для 3D-друку, виходячи з конкретних потреб та вимог до кінцевого виробу.

Витратні матеріали для 3D-друку поділяються на дві основні категорії: для технології FDM (найбільш популярної) та SLA.

Матеріали для 3D-друку технологією FDM поділяються на кілька категорій залежно від їх технологічних характеристик та призначення. Кожна група матеріалів спеціалізується на виконанні конкретних завдань, забезпечуючи необхідні властивості для певних видів друкованих виробів [55-58]. До цих груп можна віднести наступні пластики: загального призначення; технічні; специфічні; декоративні та допоміжні [26].

В дисертаційній роботі використовуються пластики загального та технічного призначення. Тому більш детально розглянемо саме їх.

1. Матеріали загального призначення [57, 59, 60]. Використовуються для створення виробів, які не знаходяться під дією значних механічних, термічних та інших видів навантаження. Вони застосовуються найчастіше. Основні з них - це ABS та PLA, відомі своєю універсальністю і доступністю.

ABS (акрилонітрилбутадієнстирол) - це один із самих популярних матеріалів для FDM 3D-друку, який відрізняється легкістю обробки, жорсткістю, ударостійкістю, високою термостійкістю, довговічністю тощо. Він витримує температуру від -40 до +90 °С, але вимагає підігріву платформи при друці. ABS застосовують для виготовлення механічних деталей, корпусів техніки, складальних конструкцій тощо. Завдяки своїм властивостям матеріал ідеально підходить для прототипування [57].

2. Технічні пластики [58], що застосовуються у тривимірному друці, можна розділити на дві категорії: міцні (PC, PBT, PET, PETG, Nylon, PEEK, CoPET, POM, Carbon Fiber, PP) для створення жорстких деталей і виробів, та гнучкі (TPU, Elastan, Plastan, Primalloy, Filaflex, ColorFabb) для деталей та виробів, що потребують гнучкості.

PET (поліетилентерефталат) відноситься до першої категорії та застосовується як у промисловості так і 3D-друці завдяки своїм безпечним властивостям, особливо для виробів, що контактують з харчовими продуктами. PET є міцним, еластичним, зносостійким, термостійким матеріалом. Застосовується для виготовлення зубчастих коліс, конструкційних елементів, корпусів техніки, електромонтажної фурнітури тощо.

Термопластичний поліуретан (TPU) відноситься до другої категорії і є розповсюдженим матеріалом у промисловості, але новим матеріалом у тривимірному друці. Йому притаманна висока міцність, гнучкість та мінімальна усадка при охолодженні. TPU характеризується відмінною адгезією між шарами, зносостійкістю, але вимагає спеціальних налаштувань пристрою для тривимірного друку через свою гнучкість. Він є еластичним, пружним матеріалом. Цей матеріал ідеально підходить для виготовлення гнучких, але міцних деталей, здатних витримувати температуру до 80 °С. Матеріал з такими властивостями ідеально підходить для виготовлення гнучких деталей та

виробів легкої промисловості.

Більш детально технічні характеристики пластиків, що відносяться до різних груп, описано в роботі [26]. В статті приведений не повний перелік сучасних 3D матеріалів, а лише представлена невелика їх частина. Існують інші полімерні матеріали, які не були включені в огляд. Їх особливості, технічні характеристики та можливості застосування можна знайти в технічній документації виробників.

3. Специфічні матеріали. До них відносяться композиційні матеріали, зокрема ті, що армовані металевими порошками, арамідними та вуглецевими волокнами, і застосовуються для створення міцних виробів у промисловості та техніці [61-63]. Ці композити знаходять застосування від декоративних елементів до авіаційних деталей [64-66]. Більш детально про композиційні суміші та обладнання для тривимірного друку ними наведено в [67, 68].

4. Декоративні пластики. Вони призначені для виготовлення естетичних виробів, які імітують традиційні матеріали [58]. Композиційні матеріали, до складу яких входять металеві частки, набули популярності у тривимірному друці завдяки своїм унікальним властивостям. В адитивних технологіях використовують різноманітні металеві порошки титан Ti, нержавіючу сталь SS, алюміній AL, мідь Cu, залізо Fe для створення деталей та виробів [68-70]. Ці технології дозволяють створювати вироби з високою точністю та різноманітними естетичними ефектами.

Узагальнена класифікація полімерних матеріалів для тривимірного друку приведена на рисунку 1.13. Вона ґрунтується на їх механічних і хімічних властивостях, призначенні та сферах застосування. Наявність такої інформації сприяє швидкому вибору відповідних матеріалів для 3D-друку, залежно від конкретних потреб та умов експлуатації, а також забезпечує можливість їх порівняльного аналізу.

Для кожного типу матеріалу повинні бути відомі робоча температура, до якої повинен нагріватися матеріал в друкуючій головці, і температура підігріву робочого столу (платформи) для кращого прилипання першого шару. Дані величини не завжди однакові для певного типу полімеру. В таблиці Д.1

(додаток Д) наведений їх приблизний діапазон. Оптимальні температури нагрівання повинні вказуватися в супровідному документі на матеріал, але це відбувається далеко не завжди, і часто їх доводиться підбирати експериментально.

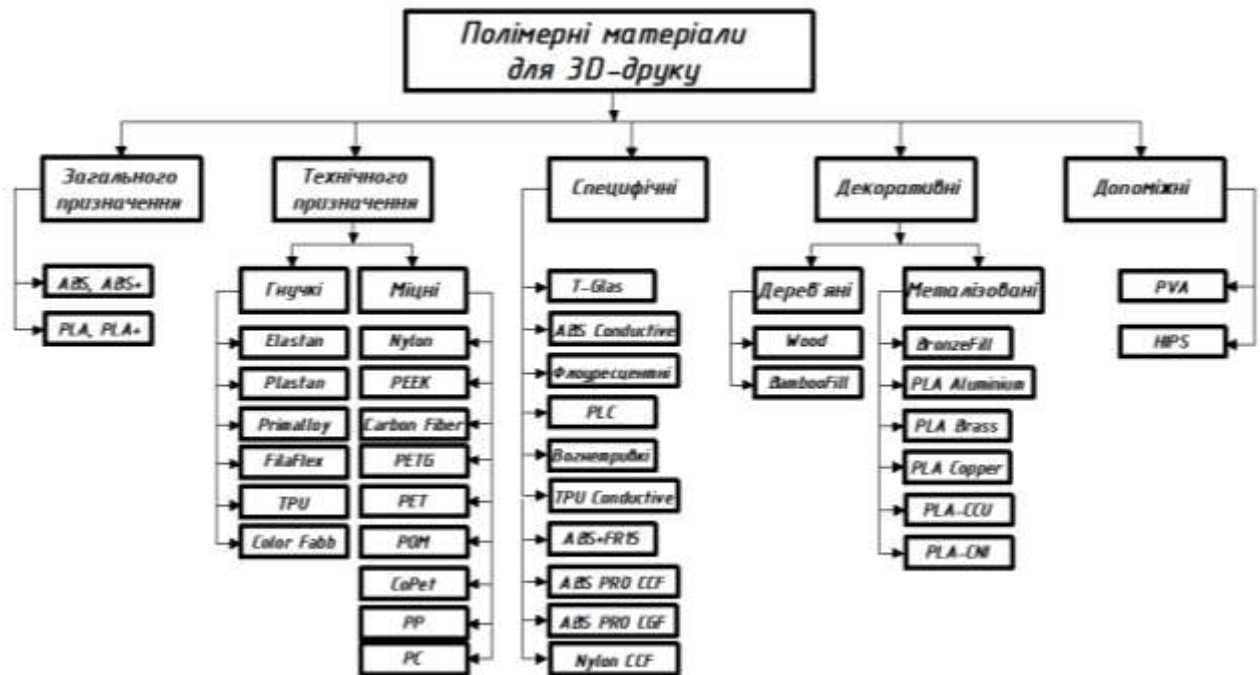


Рисунок 1.13 – Узагальнена класифікація 3D матеріалів

Таблиця Д.2 (додаток Д) дозволяє полегшити вибір полімерів на етапі проектування деталі чи виробу. Це можливо завдяки рекомендаціям по використанню пластика для виготовлення готової продукції в різних галузях, зокрема в легкій промисловості.

Вибір ABS, TPU, PET та PLA пластиків для дослідження FDM-друку з використанням обладнання тривимірного друку зі шнековим екструдером базується на аналізі їх властивостей та призначення.

1. ABS пластик вибрано завдяки описаним вище його властивостям та відмінну придатність до механічної обробки. Це робить його ідеальним для виготовлення корпусів, кріплень, деталей та елементів обладнання легкої промисловості і деталей одягу та взуття.

2. Для нанесення об'ємних зображень на тканини в легкій промисловості найбільше підійдуть інженерні термопластичні еластомери TPU та Elastan.

Основні властивості TPU описані вище. Його твердість становить 90А за шкалою Шора, а видовження при розриві досягає 510%. Цей матеріал має гладку, глянцеvu поверхню та майже не виділяє запаху при 3D-друці. Виробники рекомендують його для виготовлення гнучких деталей [71].

Elastan представляє собою високоеластичний матеріал, ідеальний для 3D-друку гнучких предметів. Він може витримувати температурний діапазон від -40 до +120 °С, а також змінні навантаження. Твердість Elastan може варіюватися від 40 за шкалою Шор А до 95 за шкалою Шор D, роблячи його відмінним вибором для 3D-друку деталей, що зазнають динамічних навантажень. Elastan знаходить застосування у різних галузях промисловості, включаючи друк взуття або підшов, завдяки своїй високій зносостійкості [72].

Для подальших експериментальних досліджень було вибрано TPU пластик, якому притаманна висока міцність та еластичність. Його властивості дозволяють використовувати матеріал для друку гнучких та міцних деталей, а також для нанесення об'ємних рисунків на текстильні матеріали та шкіру при виготовленні виробів швейної, взуттєвої та шкіргалантерейної галузей [73].

3. Вибір поліетилентерефталату зумовлений можливістю переробки великої кількості пластикових відходів та створення з них готових виробів для машинобудування та обладнання легкої промисловості [74-76]. PET є безпечним для контакту з харчовими продуктами, має високу міцність, еластичність, зносостійкість, термостійкість та діелектричні властивості.

Ці матеріали були обрані за свої унікальні властивості, що задовольняють конкретні вимоги до готової продукції.

1.6. Аналіз полімерних відходів для використання в якості вихідної сировини у 3D-друці та способів і обладнання для їх подрібнення

Проблема переробки відходів полімерних матеріалів на сьогодні залишається актуальною. Дослідження в цій сфері здійснюються як вітчизняними науковцями [77-88], так і міжнародними [89-95]. Вони

стосуються як самого процесу подрібнення, так і створення енергоефективного устаткування для механічного руйнування матеріалів.

Однак питання, пов'язане з подрібненням відходів полімерів для шнекових екструдерів 3D-принтерів, залишається актуальним, особливо з огляду на зростання об'ємів полімерних відходів легкої промисловості, зокрема ті, що вміщують поліефірні (лавсанові) і нейлонові волокна (рис.1.14), та 3D-друку (рис.1.15) [74, 75, 96, 97].



а



б

Рисунок 1.14 – Відходи полімерних матеріалів легкої промисловості:

*а* – поліестер (лавсан); *б* – нейлон [98]



а



б

Рисунок 1.15 – Відходи пластику, що утворилися під час 3D-друку:

*а* – ABS пластик; *б* – PLA пластик

Важливо зазначити, що більшість цих відходів все ще викидається або спалюється, що породжує потребу у розробці технологій переробки таких матеріалів у нові продукти для зменшення впливу на навколишнє середовище.

Одним із способів переробки пластику є використання перероблених відходів поліестеру та нейлону у витратні матеріали для 3D-принтерів. Попередньо проведені експерименти по виготовленню філаменту з подрібнених відходів зазначених матеріалів з використанням екструдера показали позитивні

результати [98].

Потреба в переробці полімерних відходів, що утворюються в процесі виготовлення деталей та виробів із використанням тривимірного друку на сьогодні є актуальною. Збільшення використання пластиків викликає зростання об'ємів відходів, що ставить перед виробниками завдання їх ефективної утилізації. Переробка полімерів дає змогу знизити витрати на нові матеріали та зменшити екологічний вплив [10, 99]. Відходи 3D-друку, наприклад, невдало надруковані деталі, підтримуючі структури (рис.1.15), можуть бути повторно застосовані [100]. Така переробка не лише вирішує проблему відходів, але й сприяє сталому розвитку виробництва, особливо у сфері тривимірних технологій.

Збільшення виробництва та споживання полімерних матеріалів призводить до накопичення твердих побутових відходів, що становить загрозу навколишньому середовищу [101]. Особливо це стосується відходів поліетилентерефталату (PET), які практично не розкладаються. Їх переробка ще недостатньо розвинена. Сучасні технології переробки пластикових пляшок дозволяють економити ресурси, зменшуючи потребу в первинній сировині. Вирішення проблеми переробки PET вимагає використання інноваційних методів. Одним із способів переробки пластику є використання перероблених відходів поліетилентерефталату, зокрема PET-пляшок, у витратні матеріали для 3D-принтерів (рис.1.16).



а



б

Рисунок 1.16 – PET – пляшки ємністю 1,5 л, які були у вжитку:

а – пляшка; б – кришка

Переробка полімерних матеріалів включає широкий спектр процесів, що перетворюють вихідну сировину в готовий виріб із заданими властивостями. Вибір методу переробки залежить від особливостей кінцевої продукції, властивостей полімеру та економічних чинників. Методи розділяються на: підготовчі, основні та завершальні. Підготовка сировини для шнекового екструдера обладнання тривимірного друку впливає на якість виконання технологічної операції та ефективність процесу [102].

Важливими факторами є однорідність та розмір часток пластику, вологість, температурна підготовка, чистота та ступінь подрібнення. Неправильний розмір часток може призвести до проблем з плавленням і стабільністю розплавленого потоку полімеру. Надмірна вологість гранул може викликати дефекти в готовому виробі, тому вихідну сировину часто необхідно попередньо висушити. Наявність бруду може привести до погіршення якості друку і пошкодити устаткування. Отже, правильна підготовка вихідної сировини є ключовою для забезпечення якості і ефективності процесу екструзії.

Ступінь подрібнення та сортування часток є основними аспектами в промисловості, зокрема у виробництві полімерів та їх переробці. Частки класифікуються за розміром від кускових до пилоподібних.

Сипучі матеріали в залежності від розмірів часток можна розділити на п'ять груп [101]: кускові (більше 10 мм); крупнозернисті (2–10 мм); мілкозернисті (0,5–2 мм); порошкоподібні (0,05–0,5); пилоподібні (<0,5 мм). Оптимальний розмір часток залежить від специфіки процесу та обладнання. Для екструдерів, дрібніше подрібнення може забезпечити кращу переробку та однорідність готового виробу.

Важливою характеристикою сипучих матеріалів є дисперсність. Дисперсність визначає їх технологічні властивості і може бути виражена функцією розподілення часток (зерен) по крупності.

Важливим методом контролю є ситовий аналіз, який дозволяє визначити розподіл часток за розмірами і вибрати оптимальні параметри для певного виробничого процесу. Сортування часток полімеру за розміром та іншими



характеристиками дасть змогу забезпечити однорідність і ефективність процесу екструзії в шнековому екструдері.

Подрібнення має широке застосування у багатьох галузях, від хімічної промисловості до домашнього господарства [101].

Механічне подрібнення полімерів є основним процесом у багатьох промислових галузях. Вибір устаткування для подрібнення залежить від міцності та розміру матеріалу, а також від потреби в певному ступені дисперсності кінцевого продукту. Існують різні типи млинів та дробарок, які забезпечують грубе, середнє, дрібне та надтонке подрібнення. Принцип роботи дробарок ґрунтується на різних фізичних ефектах, таких як: удар, роздавлювання, різання або стирання, в той час як в млинах може відбуватися тонкий та надтонкий помол матеріалу.

За принципом дії та конструкцією розрізняють різні типи дробарок, такі як: щоківі з різними видами руху щок, конусні з рухомими валами, валкові, молоткові, бігуни, дезінтегратори, а також млини кільцеві, кульові та вібраційні.

Важливими критеріями вибору устаткування для подрібнення є продуктивність, надійність і ефективність його витрат. Правильно підібране обладнання для подрібнення забезпечить якість подальшої переробки і ефективність процесу в цілому [78, 103].

### 1.7. Перспективи застосування технології тривимірного друку в легкій промисловості

Легка промисловість України, традиційно не будучи пріоритетною галуззю, пережила значний спад у 90-х роках минулого століття, але нині частково відновилася завдяки зростанню малих та середніх підприємств [18]. Сучасні тренди включають перехід від натуральних тканин до синтетичних матеріалів та «розумних тканин» з унікальними властивостями, такими як самоочищення або акумулювання сонячної енергії. Ще одним трендом є

персоналізація одягу та застосування 3D-друку в швейному та взуттєвому виробництвах, що відкриває нові можливості для галузі [17].

3D-друк – це інноваційна технологія для створення тривимірних об'єктів, що широко застосовується у різних галузях завдяки своїй швидкості, доступності та простоті керування [104]. Ця технологія перетворює цифрові моделі в готові вироби та вимагає точної підготовки та доведення їх до якісного стану після друку [105, 106]. Принцип роботи обладнання тривимірного друку, як вже відмічалось, залежить від технології, що використовується, серед яких найпопулярнішою є FDM-друк, що використовує термопластичні нитки для створення готових об'єктів [107–109]. 3D-друк розширює можливості виготовлення складних деталей у різних сферах, від автомобілебудування до легкої промисловості [20]. Ця технологія дозволяє виготовляти широкий спектр товарів та показує значний потенціал у промисловому виробництві [17].

Крім звичних напрямків, таких як: прототипування, створення архітектурних макетів, деталей, майстер-моделей, предметів побуту обладнання тривимірного друку – можна використовувати у легкій промисловості [110]. За допомогою 3D-друку можна налагодити виробництво одягу чи деталей взуття або додаткових елементів до них (фурнітури, прикрас, об'ємних елементів дизайну, устілок, підошов тощо), а також деталей обладнання легкої промисловості (рис.1.17) [19, 74, 111].

На сьогодні використовуються різні методи для нанесення зображення на тканину, вибір яких залежить від характеристик матеріалу та бажаного візуального результату. Основні методи, які існують на сьогодні, можна класифікувати наступним чином: сублімаційний друк, термотрансферний (шовкографія) друк та цифровий друк (рис.1.18) [112].

Сублімаційний друк застосовується для тканин з мінімум 60% поліестеру, тим самим забезпечуючи якісні зображення на світлих матеріалах, які стійкі до прання. Термотрансферний друк підходить для тканин з натуральних волокон. Через прямий або непрямий трафаретний друк можна створювати невеликі зображення, або виконувати серійний друк. Шовкографія дозволяє створювати

різноманітні ефекти. Вона використовується в індустрії моди для виготовлення унікального одягу з довговічними зображеннями. Цифровий друк відрізняється високою якістю і стійкістю до прання, в залежності від складу тканини, але є вартіснішим і вимагає особливого догляду.

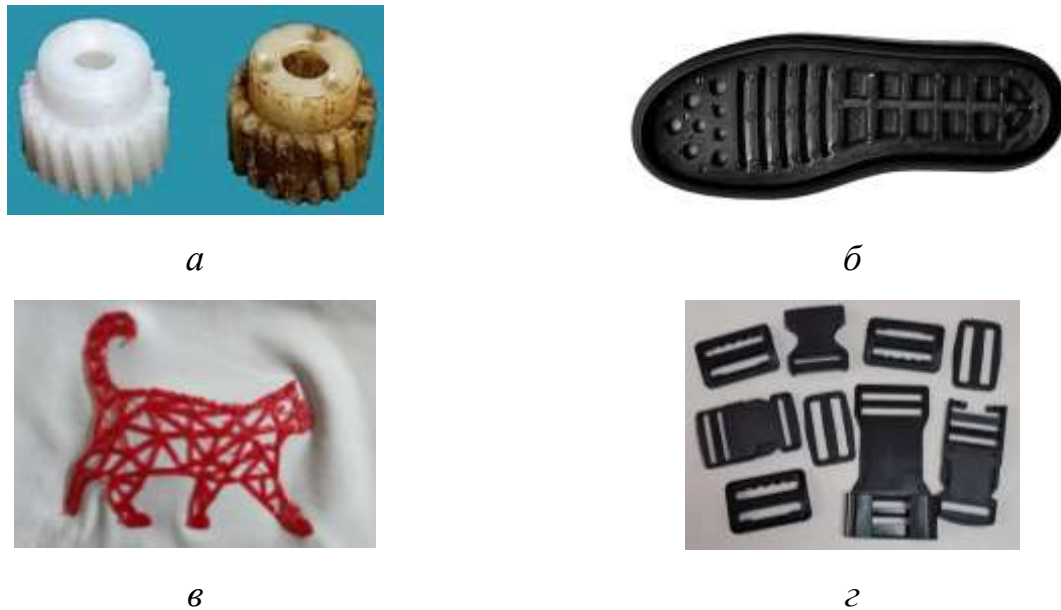


Рисунок 1.17 – Виготовлення деталей на 3D-принтері: а–шестерня; б–підшва взуття; в–елемент дизайну на тканині; г–швейна та взуттєва фурнітура

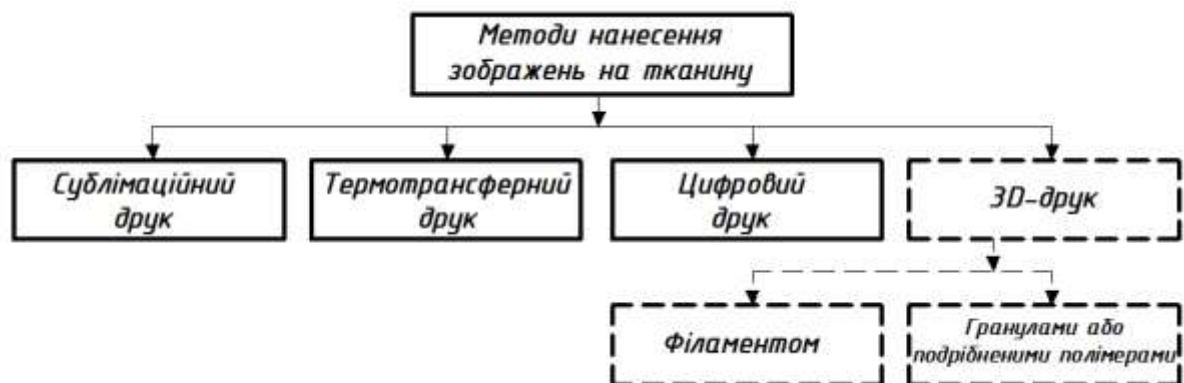


Рисунок 1.18 – Класифікація методів нанесення зображень на тканину

Пропонується до цієї класифікації, крім відомих, додати ще один метод нанесення об'ємних зображень на тканину - за допомогою 3D-друку.

Через широке застосування 3D-друку спостерігається тенденція пошуку нових, інноваційних матеріалів для виробництва деталей та виробів [113, 114].

Деякі матеріали для 3D-друку вже придатні для створення елементів одягу та їх асортимент розширюється.

Технологія 3D-друку впроваджується у модну індустрію, де дизайнери інтегрують 3D-друк у високу моду. Вона дозволяє комбінувати різні матеріали для підвищення міцності та еластичності. Виробники взуття, такі як Nike, Adidas, Reebok, використовують 3D-друк для створення нових моделей, що може збільшити попит на такі технології у легкій промисловості [19]. Adidas виробляє кросівки з 3D-друкованими підошвами, а Reebok планує виробництво взуття з 3D-елементами, знижуючи вартість виробництва.

Використання 3D-принтерів у виробництві одягу та взуття не обмежується лише кількома прикладами. Існують численні застосування, де ці пристрої використовуються для створення різноманітних компонентів і деталей.

Перспективи використання 3D-друку при виробництві одягу є значними і різноманітними [17]. У майбутньому практика створення одягу за індивідуальними параметрами клієнта за допомогою 3D-технологій стане більш поширеною. Це включатиме не лише проектування і друк елементів одягу, але й розвиток спеціалізованого обладнання для швейної промисловості, яке дозволить оптимізувати виробничі процеси і забезпечити високу точність і якість кінцевих продуктів. 3D-друк також дозволить створювати унікальні, персоналізовані вироби, що буде сприяти розвитку малих та середніх підприємств.

Розглянемо шляхи застосування 3D-друку в швейній промисловості.

1. 3D-друк фурнітури та аксесуарів для одягу. Розробка пластикової фурнітури або аксесуарів для одягу за допомогою 3D-друку, включаючи процес тестування, модифікації та оптимізації дизайну до масового виробництва.

2. Швидке відновлення фурнітури та аксесуарів. Використання 3D-принтерів у швейних ательє для оперативного відновлення або заміни пошкоджених або втрачених деталей одягу.

3. Персоналізований одяг. Створення одягу, що ідеально відповідає

індивідуальним параметрам клієнта за допомогою 3D-сканування та друку [115]. Використання цієї технології мінімізує відходи матеріалів і скорочує час виробництва.

Сучасне взуття характеризується складною конструкцією та наявністю численних деталей, зокрема, у спортивному взутті. Подошви часто мають ускладнену форму із вбудованими активними елементами для амортизації і покращення спортивних показників. Ці елементи можуть бути інтегровані безпосередньо у подошву або виготовлені у вигляді вставок. Традиційні методи виробництва часто не можуть впоратися зі складною геометрією таких деталей, тому 3D-друк стає оптимальним рішенням, дозволяючи створювати складні конструкції взуття більш ефективно і інноваційно [20].

Використання 3D-технологій у взуттєвій індустрії відкриває широкі можливості для інновацій у дизайні та виробництві. Це включає розробку нових стилів і конструкцій, створення унікальних елементів взуття з високою точністю, та виробництво взуття, яке ідеально підходить до індивідуальних особливостей кожного користувача. 3D-друк також дозволяє прискорити процес від концепції до виробництва, забезпечуючи більш ефективне використання ресурсів і зменшення відходів.

Можливі напрямки застосування 3D-друку у взуттєвій промисловості.

1. Інноваційний дизайн взуття. Використання 3D-технологій дозволяє дизайнерам та конструкторам взуття ефективно розробляти, тестувати і модифікувати моделі, прискорюючи процес від концепції до виготовлення готового виробу.

2. 3D-друк фурнітури для взуття. Аналогічно до одягу, можна використовувати 3D-друк для створення потрібної пластикової фурнітури та аксесуарів для взуття.

3. Взуття на індивідуальне замовлення. Використання 3D-сканування і друку дозволяє виготовляти взуття, що ідеально відповідає індивідуальним особливостям ніг замовника, підвищуючи комфорт і знижуючи ризик травм [115, 116].

Текстильні матеріали, шкіра, полімерні матеріали, з яких виготовляють одяг та взуття, створюють значний негативний вплив на довкілля через велику кількість відходів, які потрапляють на звалища. Впровадження біорозкладних полімерів у виробництво одягу та взуття з використанням 3D-друку може стати вирішенням цієї проблеми. Такі матеріали здатні розкладатися після закінчення свого терміну служби, тим самим зменшуючи екологічний вплив. Розробка 3D-принтерів, що використовують полімерні відходи від виробництв текстильної та легкої промисловостей, також може допомогти вирішити проблему забруднення, перетворюючи відходи на нові готові вироби.

Розглядаючи використання 3D-друку у спеціалізованому машинобудуванні, зокрема у виробництві обладнання для легкої промисловості та інших галузей, можна виділити кілька ключових спрямувань, а саме розробка та виготовлення складних компонентів, прототипів, інструментів та запчастин. Використання цієї технології сприятиме оптимізації виробничих процесів та стимулюватиме інноваційні підходи у дизайні обладнання [20, 116].

Розглянемо можливі напрямки застосування 3D-друку в обладнанні легкої промисловості.

1. Розвиток нових технологій у галузевому машинобудуванні потребує оперативного створення та оцінки прототипів. 3D-друк дозволяє швидко реалізовувати цю задачу. Це стосується тих випадків, коли потрібні кардинальні зміни у конструкціях. Створення прототипів є економічно вигідним для дрібносерійного виробництва. 3D-друк полімерами без барвників дозволяє створювати прозорі прототипи для оцінки механізмів із середини.

2. У швейному та взуттєвому устаткуванні часто застосовуються полімерні деталі. 3D-друк ідеально підходить для виготовлення дублікатів у разі їх поломки або зносу, знижуючи витрати та час на ремонт.

3. 3D-друк може бути використаний для створення прес-форм для термопласт-автоматів у галузевому машинобудуванні, включаючи литтєві машини для взуттєвого виробництва при виготовленні взуття. Це забезпечує переваги, такі як скорочення часу виробництва та вартості.

Використанням 3D-принтерів у виробництві одягу, взуття та шкіргалантарейних виробів має більш широкий спектр можливостей. Наприклад, 3D-друк може застосовуватися для створення модних аксесуарів, виготовлення взуття на замовлення з особливими характеристиками, наприклад, для спортсменів та людей, які потребують ортопедичного взуття тощо. Ці технології сприяють більш екологічному та сталому виробництву, зменшуючи кількість відходів і їхній вплив на довкілля.

Ще одним напрямком застосування тривимірного друку є освітній процес вищих навчальних закладів. Він відкриває широкі можливості для створення наочних макетів, пов'язаних з технологіями та обладнанням легкої промисловості. Це сприяє підвищенню ефективності навчання та кращому засвоєнню матеріалу студентами. Використання фізичних моделей, створених за допомогою 3D-друку, дозволяє студентам більш практично вивчати і візуалізувати складні концепції. Це також дає можливість легко перетворювати цифрові проекти на реальні об'єкти, що сприяє глибшому розумінню предмету.

Впровадження інноваційних, ресурсозберігаючих тривимірних пристроїв на підприємствах легкої промисловості дасть змогу забезпечити випуск конкурентоспроможної продукції з покращеними техніко-економічними показниками [98].

## 1.8. Висновки до першого розділу

У результаті аналізу сучасного стану використання технологій та обладнання тривимірного друку для виготовлення деталей та виробів встановлено:

1. Серед різних способів створення готової продукції найбільш оптимальним для виготовлення об'ємних деталей та виробів легкої промисловості є адитивний метод (3D-друк), застосування якого дасть змогу забезпечити розширення виробничих можливостей підприємства та за рахунок високого ступеня індивідуалізації та гнучкості покращити ефективність

виробничих процесів.

2. Проведений аналіз дав змогу виявити значний потенціал у гранул чи подрібнених відходів полімерів як вихідної сировини обладнання тривимірного друку в порівнянні з традиційним друком філаментами. Подрібнені матеріали відкривають нові можливості для виготовлення деталей для різних галузей промисловості, знижуючи вартість готової продукції. Розроблена класифікація дозволила підібрати обладнання з оптимальними характеристиками, що працює за FDM технологією для потреб легкої промисловості та використовує зазначену сировину в якості витратного матеріалу.

3. Огляд технічної літератури та патентів в напрямку існуючих розробок 3D-устаткування з шнековою екструзією підтвердив інтерес науковців до його створення та впровадження таких пристроїв в різних галузях промисловості. Таке обладнання завдяки своїй інноваційності, універсальності та точності є важливим для промислового використання.

4. В ході проведеного аналізу різних конструкцій екструзійних сопел, що використовуються в 3D-принтерах, було встановлено, що їх можна розділити за зовнішньою та внутрішньою будовою, діаметром вихідного отвору для витікання розплавленого полімеру та матеріалу, з якого вони виготовлені. На основі цього було розроблено їх класифікацію. Також було визначено основні характеристики та параметри, які впливають на їх ефективність та сумісність з шнековим екструдером обладнання тривимірного друку. Було встановлено оптимальні конструкції сопел, які відповідають специфічним вимогам шнекової екструзії та забезпечать високу якість та точність під час тривимірного друку на обладнанні, що удосконалюється.

5. Проведений аналіз основних видів полімерних матеріалів, що застосовуються в технології FDM-друку, дозволив детально розглянути їх технічні характеристики та потенційні сфери використання. Зібрана і систематизована інформація у вигляді розробленої узагальненої класифікації та зведення властивостей пластиків у вигляді таблиці дає змогу здійснювати підбір полімерних матеріалів для різних цілей виробництва, зокрема і для



виготовлення готової продукції легкої промисловості з використанням обладнання тривимірного друку з шнековим екструдером. Здійснений аналіз властивостей, наведених в таблиці, дав змогу підібрати полімерні матеріали, що найбільше підходять для виготовлення деталей та виробів швейної та взуттєвої промисловостей, а також деталей для технологічного обладнання. Такими матеріалами є ABS, TPU, PLA та PET пластики. Але їх застосування потребує подальшого експериментального підтвердження.

6. Здійснений аналіз полімерних відходів адитивних технологій та легкої промисловості показав, що їх можна ефективно застосовувати як вихідну сировину в шнековому екструдері обладнання тривимірного друку. В якості витратних матеріалів для 3D-друку також можуть бути використані пластикові PET-пляшки. Їх переробка сприятиме зменшенню впливу вторсировини на навколишнє середовище. Вивчення фізико-механічних характеристик відходів та існуючого устаткування, яке використовується для їх подрібнення, дало змогу визначити оптимальні способи їх переробки та підібрати обладнання, яке забезпечить отримання фракції потрібної для живлення шнеку екструдера.

7. Проведений аналіз показав, що обладнання тривимірного друку з шнековим екструдером має перспективи застосування в легкій промисловості. Його використання дозволяє створювати індивідуальні елементи взуття та одягу, виготовляти деталі для обладнання легкої промисловості з високою точністю та якістю. Окрім цього, таке устаткування має потенціал застосування у навчальному процесі, що дозволить студентам вирішувати складні технічні задачі.

### 1.9. Задачі дослідження

1. Удосконалити узагальнену класифікацію 3D-принтерів, провести аналіз екструзійних систем подачі полімерного матеріалу та обладнання в якому вони використовуються, здійснити вибір екструдера для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості.

2. Аналітично дослідити основні параметри бункера, шнека, сопла та визначити об'ємну продуктивність, тиск в зонах живлення і дозування шнекового екструдера з метою встановлення його споживаної потужності.

3. Провести аналіз існуючих конструкцій сопел, що застосовуються в 3D-принтерах, їх характеристик та сумісності з шнековим екструдером на основі чого розробити нові конструкції насадок.

4. Розробити шнековий екструдер, що використовує гранули чи подрібнені відходи полімеру в якості вихідної сировини та синхронізувати його роботу з обладнанням тривимірного друку.

5. Розробити ефективну систему охолодження екструдера обладнання тривимірного друку, що запобігає перегріву полімерного матеріалу в завантажувальному бункері та підтримує стабільність процесу виготовлення деталей і виробів легкої промисловості.

6. Здійснити експериментальне дослідження подрібнених полімерних відходів, які використовуються як вихідна сировина для шнекового екструдера обладнання тривимірного друку з метою визначення їх фізико-механічних характеристик та отримати регресійні рівняння, що описують залежність насипної густини матеріалу від діаметру подрібнених часток полімеру.

7. Експериментально визначити об'ємну продуктивність шнекового екструдера обладнання тривимірного друку та на основі цього отримати регресійні моделі, що пов'язують продуктивність пристрою з діаметром подрібнених часток полімеру, частотою обертання шнека та температурою їх плавлення.

8. Здійснити експериментальне дослідження фізико-механічних характеристик зразків, надрукованих на обладнанні тривимірного друку зі шнековим екструдером із гранул та подрібнених відходів полімерів та надати рекомендації щодо його практичного використання для виготовлення деталей і виробів легкої промисловості.

## РОЗДІЛ 2.

АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА  
ОБЛАДНАННЯ ТРИВИМІРНОГО ДРУКУ

2.1. Визначення основних параметрів шнекового екструдера в зоні живлення

Під час руху матеріалу вздовж каналу шнека екструдера безперервно змінюється кілька його станів від твердого на вході каналу до в'язкої рідини на виході [117]. При цьому цей канал традиційно поділяють на три функціональні зони: живлення (I), плавлення (II) і гомогенізації (III) (рис.2.1).

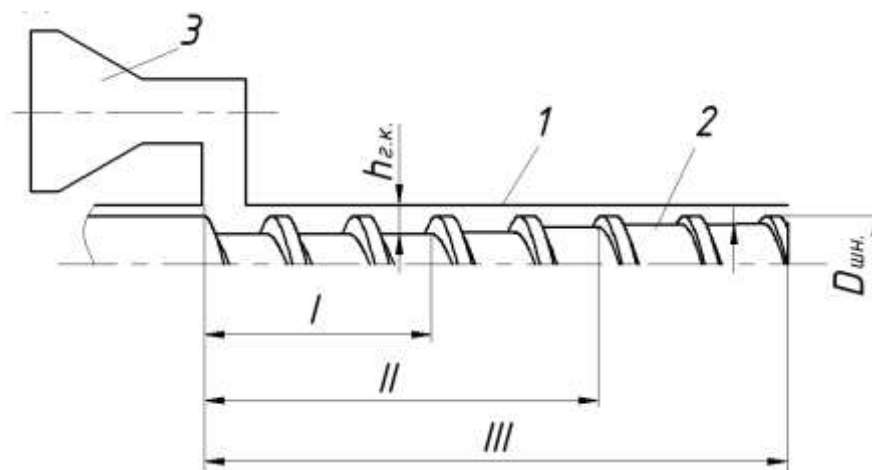


Рисунок 2.1 – Схема одношнекового екструдера: 1 – матеріальний циліндр; 2 – шнек; 3 – завантажувальний бункер; I, II, III – функціональні зони шнека;  $h_{г.к.}$  – глибина гвинтового каналу (глибина нарізки);  $D_{шн.}$  – діаметр шнека

У зоні живлення полімер перебуває у твердому стані і транспортується вздовж матеріального циліндра 1 (рис.2.1) за рахунок сил тертя. Зазвичай, канал шнека заповнений полімером, де відбувається ущільнення гранул через сухе тертя об стінки циліндра 1 і шнека 2, що призводить до збільшення тиску. Водночас, повітря, що залишилося між гранулами, вивільняється через завантажувальний отвір 3. У місцях тертя з'являється тепло, що вимагає

охолодження (повітрям, водою тощо), щоб запобігти передчасному розплавленню полімеру. При відсутності або неефективності охолодження полімер починає плавитися і витісняється назад у завантажувальний бункер, порушуючи процес подачі екструдера.

У зоні живлення полімер перебуває у твердому стані і транспортується вздовж матеріального циліндра 1 (рис.2.1) за рахунок сил тертя. Під час руху пластику через робочий канал він ущільнюється, нагрівається, і тиск зростає через тертя між поверхнями шнека і циліндра. Багато теоретичних досліджень процесу екструзії базуються на фізичній моделі, в якій ущільнені частинки полімеру під час руху через канал не зсуваються відносно одна одної. Це відбувається через те, що сили внутрішнього тертя полімеру значно переважають сили тертя полімеру по сталі, і частинки рухаються як єдине еластичне стиснуте середовище завдяки балансу сухого тертя між стінкою матеріального циліндра 1 та шнеку 2.

Геометричні параметри екструдера в зоні живлення представлені на рисунку 2.2.

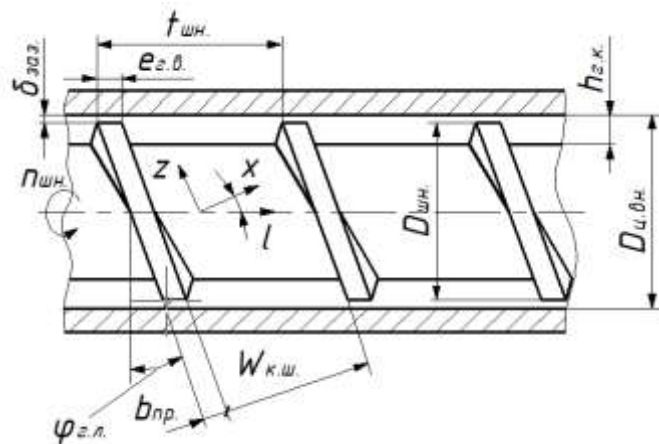


Рисунок 2.2 – Геометричні параметри екструдера в зоні живлення:

$D_{ц.вн.}$  – внутрішній діаметр матеріального циліндра;  $t_{шн.}$  – крок гвинтової нарізки;  $e_{г.в.}$  – ширина гребеня витка;  $\delta_{заз.}$  – величина зазору між гребенем шнека та внутрішньою стінкою матеріального циліндра;  $\varphi_{г.л.}$  – кут підйому гвинтової лінії нарізки шнека;  $W_{к.ш.}$  – ширина каналу шнека в напрямку нормалі до стінки;  $b_{пр.}$  – ширина прольоту

У зоні живлення екструдера, глибина каналу шнека значно менша, ніж діаметр отвору в матеріальному циліндрі. Ця особливість дозволяє відтворити гвинтовий канал розгорнутим на площину. Для спрощення візуалізації взаємодії між каналом шнека, матеріальним циліндром та матеріалом, уявімо це як зворотний відносний рух: канал шнека залишається статичним (нерухомим), тоді як поверхня циліндра переміщується в напрямку  $l$  з певною швидкістю  $V_c$  (рис.2.3).

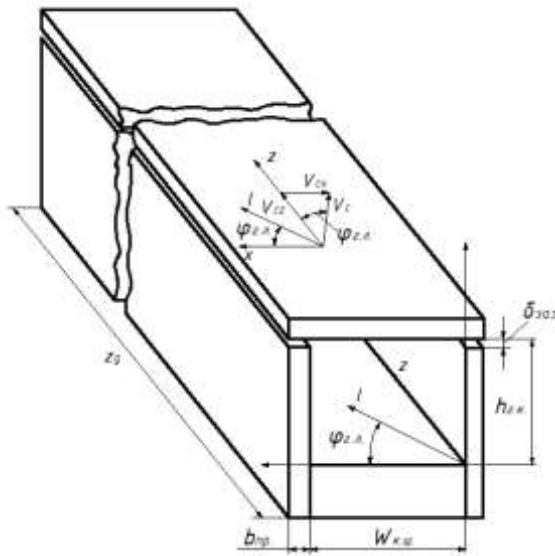


Рисунок 2.3 – Схема розгорнутого каналу екструдера для розрахунку продуктивності

Надалі в розрахунках зроблено припущення, що зазор  $\delta_{заз.}$  між внутрішньою стінкою матеріального циліндра 1 та шнеком 2 (рис.2.1) незначний і ним, в наступних розрахунках, можна знехтувати.

Тоді:

$$V_c = \pi \cdot D_{ин.} \cdot n_{ин.}, \quad (2.1)$$

де  $n_{ин.}$  - частота обертання шнека.

Проекції швидкості  $V_c$  на осі  $x$  та  $z$  визначаються наступними виразами:

$$V_{cx} = \pi \cdot D_{ин.} \cdot n_{ин.} \cdot \sin(\varphi_{z.l.}), \quad (2.2)$$

$$V_{cz} = \pi \cdot D_{ин.} \cdot n_{ин.} \cdot \cos(\varphi_{z.l.}). \quad (2.3)$$

Зв'язок координати переміщення в напрямку  $z$  і в напрямку  $x$  (вздовж осі обертання шнека в напрямку  $l$ , визначається рівнянням:

$$z = \frac{x}{\sin(\varphi_{z,l.})} = \frac{l}{\sin(\varphi_{z,l.})}. \quad (2.4)$$

Визначення продуктивності зони живлення екструдера.

Розглянемо рух матеріалу в зоні живлення екструдера за допомогою схеми, що представлена на рисунку 2.4. Канал шнека (рис.2.4) рухається зі швидкістю  $V_c$ . Точка А визначає початкове положення елемента матеріалу.

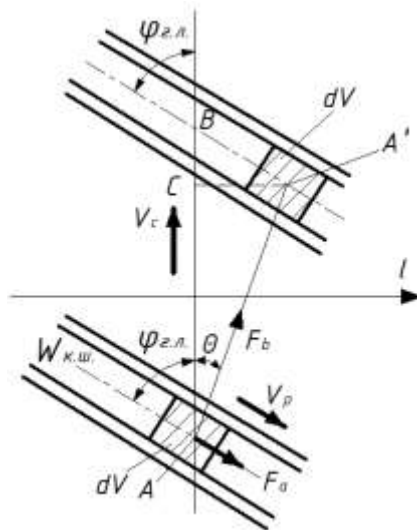


Рисунок 2.4 – Схема руху матеріалу в зоні живлення екструдера

Протягом часу  $t_{p.m.}$  канал шнека разом з матеріалом переміститься на відрізок  $AB$ . Рух матеріалу відбувається за рахунок дії сил тертя, що виникають на поверхнях його контакту з гвинтовим каналом. Точка  $A$  зміститься відносно поверхні циліндра на відрізок  $AA'$ , а відносно поверхні каналу шнека – на відрізок  $BA'$ . Тоді можна виразити швидкість  $V_p$ , як відношення шляху переміщення матеріалу і часу цього переміщення:

$$V_p = \frac{BA'}{t_{p.m.}}. \quad (2.5)$$

Час переміщення матеріалу можна представити відношенням:

$$t_{p.m.} = \frac{AB}{V_c}, \quad (2.6)$$

де  $V_c$  - швидкість, що визначається за формулою (2.1).

За тригонометричними співвідношеннями для трикутників  $CBA'$  та  $CAA'$ , враховуючи (2.6), перепишемо рівняння (2.5) у вигляді:

$$V_p = \frac{V_c}{\cos(\varphi_{z.l.}) + \sin(\varphi_{z.l.}) \cdot \operatorname{ctg}(\theta)}. \quad (2.7)$$

Використаємо вираз для синуса від суми двох кутів і тангенса і перепишемо рівняння (2.7) у вигляді:

$$V_p = V_c \frac{\sin(\theta)}{\sin(\theta + \varphi_{z.l.})}. \quad (2.8)$$

Виразимо продуктивність у зоні живлення, як добуток швидкості  $V_p$  і площі поперечного перетину каналу шнека:

$$Q_{екс.} = W_{к.ш.} \cdot h_{z.к.} \cdot V_p. \quad (2.9)$$

Зі схеми на рисунку 2.2 отримаємо:

$$W_{к.ш.} = \left( \frac{t_{шн.}}{\lambda_{зах.}} - b_{нр.} \right) \cdot \cos(\varphi_{z.l.}), \quad (2.10)$$

де  $\lambda_{зах.}$  - число заходів нарізки шнека.

Враховуючи (2.8) і (2.10) перепишемо (2.9) у вигляді:

$$Q_{екс.} = \pi \cdot D_{шн.} \cdot n_{шн.} \cdot h_{z.к.} \cdot \left( \frac{t_{шн.}}{\lambda_{зах.}} - b_{нр.} \right) \cdot \frac{\sin(\theta) \cdot \cos(\varphi_{z.l.})}{\sin(\theta + \varphi_{z.l.})}. \quad (2.11)$$

При сталому русі матеріалу буде виконуватись умова рівноваги діючих сил:

$$F_a = F_b \cdot \cos(\theta + \varphi_{z.l.}). \quad (2.12)$$

Виконаємо аналіз руху матеріалу в зоні живлення екструдера. Представимо рівняння (2.12) у вигляді:

$$\cos(\theta + \varphi_{z.l.}) = A_b, \quad (2.13)$$

$$\text{де } A_b = \frac{F_a}{F_b}.$$

З рівняння (2.13) випливає, що при відомій величині  $A_b$  можна знайти кут транспортування матеріалу  $\theta$  та з виразу (2.11) розрахувати продуктивність екструдера.

Величина  $A_b$  може бути тільки менша одиниці, бо косинус будь-якого кута не перевищує одиницю. Рівність  $A_b=1$  можлива за умови  $F_a = F_b$ . При цьому  $\theta + \varphi_{z.l.} = 0$ , що можливо якщо  $\theta = -\varphi_{z.l.}$ .

Зрозуміло, що при такій умові пробка матеріалу не рухається у напрямку виходу з каналу, а обертається разом зі шнеком по колу. Тобто, рух матеріалу можливий за умови:

$$F_a < F_b. \quad (2.14)$$

Граничний випадок буде за умови  $F_a = 0$  і  $F_b = 0$ , що є можливим якщо  $\theta + \varphi_{z.l.} = 90^\circ$ . В цьому випадку екструдер працює з максимальною продуктивністю.

Розрахунок тиску в каналі екструдера.

Виділімо елемент об'єму матеріалу в каналі шнека екструдера довжиною  $dz$  і розглянемо діючі на нього сили. Схема для розрахунку сил, що діють на матеріал у зоні живлення приведена на рисунку 2.5.

Сила  $F_b$  - це сила тертя, що діє на матеріал при контакті з поверхнею отвору матеріального циліндру. Ця сила спонукає матеріал рухатись вздовж гвинтового каналу шнека. Сила  $F_b$  пропорційна тиску в матеріалі і направлена під кутом  $\theta$  до площини, що перпендикулярна осі шнека:

$$F_b = f_b \cdot P_y \cdot W_{к.ш.} \cdot dz, \quad (2.15)$$

де  $f_b$  - коефіцієнт тертя полімерного матеріалу по поверхні отвору матеріального циліндру;  $P_y$  - тиск в матеріалі за напрямком осі  $y$ .

Неізотропність гранул або порошку полімерного матеріалу виразимо за допомогою коефіцієнта:

$$K_y = \frac{P_y}{P_z}, \quad (2.16)$$

де  $P_z$  - тиск в матеріалі за напрямком осі  $z$ .

Враховуючи (2.16) перепишемо (2.15) у вигляді:

$$F_b = f_b \cdot K_y \cdot P_z \cdot W_{к.ш.} \cdot dz. \quad (2.17)$$



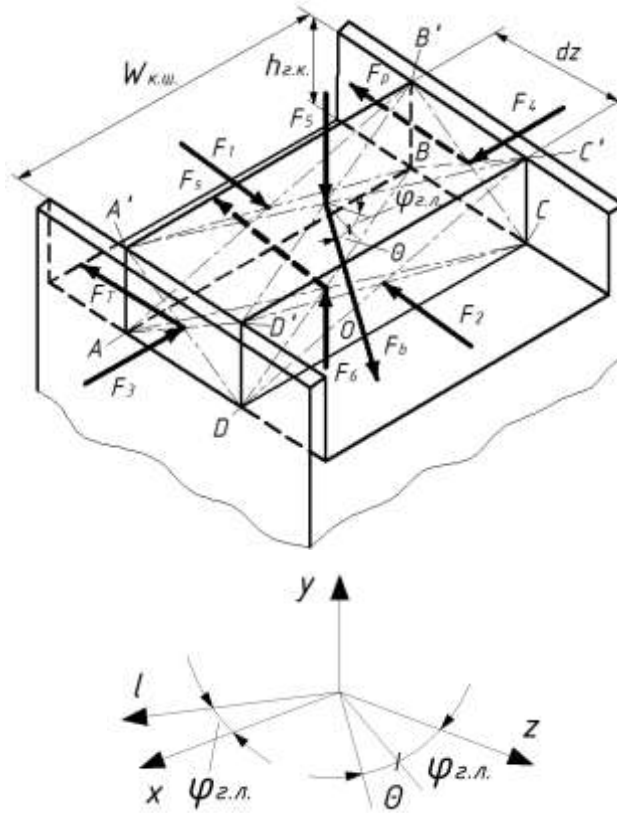


Рисунок 2.5 – Схема для розрахунку сил, що діють на матеріал у зоні живлення

Аналогічно рівняння для сили тертя  $F_s$ , що діє між матеріалом і поверхнею осердя шнека:

$$F_b = f_s \cdot K_y \cdot P_z \cdot W_{к.ш.} \cdot dz. \quad (2.18)$$

де  $f_s$  – тертя, що виникає при переміщенні матеріалу по поверхні шнека.

Сили  $F_1$  і  $F_2$  є реакціями зі сторін відкинутого матеріалу на виділений елемент  $dz$ . Вирази для  $F_1$  і  $F_2$  мають вигляд:

$$F_1 = P_z \cdot h_{2.к.} \cdot W_{к.ш.}; \quad F_2 = (P_z + dP_z) \cdot (h_{2.к.} - A_k \cdot dz) \cdot W_{к.ш.}, \quad (2.19)$$

де  $A_k$  - параметр, що визначає конусність осердя шнека;

$$A_k = \frac{(h_{2.к.1} - h_{2.к.2})}{Z_g}, \quad (2.20)$$

де  $h_{2.к.1}$ ,  $h_{2.к.2}$  – глибина каналу шнека на початку і в кінці зони живлення;

$Z_g$  - довжина каналу зони живлення шнека в напрямку осі  $z$ .

Зі сторін стінок каналу шнека діють нормальні сили  $F_3$  і  $F_4$ :

$$F_3 = K_{xT} \cdot P_z \cdot h_{2,k} \cdot dz; F_4 = K_{xp} \cdot P_z \cdot h_{2,k} \cdot dz, \quad (2.21)$$

де  $K_{xT}$ ,  $K_{xp}$  – коефіцієнти, що характеризують неізотропність поля тиску вздовж осі  $x$  по відношенню тиску вздовж осі  $z$ .

За аналогією з (2.16) запишемо:

$$K_{xT} = \frac{P_{xT}}{P_z}, \quad K_{xp} = \frac{P_{xp}}{P_z}, \quad (2.22)$$

де  $P_{xT}$ ,  $P_{xp}$  – тиск в напрямку осі  $x$  біля передньої і задньої стінок каналу шнека.

На елемент матеріалу з передньої і задньої стінок каналу шнека діють нормальні сили  $F_5$  і  $F_6$ :

$$F_5 = F_6 = K_y \cdot P_z \cdot W_{к.ш.} \cdot dz. \quad (2.23)$$

Також на елемент матеріалу з передньої і задньої стінок каналу шнека діють сили тертя  $F_T$  і  $F_p$ :

$$F_T = K_{xT} \cdot P_z \cdot h_{2,k} \cdot f_s \cdot dz; F_p = K_{xp} \cdot P_z \cdot h_{2,k} \cdot f_s \cdot dz. \quad (2.24)$$

За умови усталеного руху матеріалу векторна сума всіх діючих на нього сил повинна дорівнювати нулю. Отже, сума проєкцій діючих сил на осі координат також дорівнює нулю.

Рівняння для суми проєкцій всіх сил на вісь  $z$  має вигляд:

$$F_1 - F_2 - F_T - F_p - F_s + F_b \cdot \cos(\theta + \varphi_{2,l.}) = 0. \quad (2.25)$$

Зробимо припущення, що  $dP_z \cdot h_{2,k} \cdot W_{к.ш.} \gg dP_z \cdot A_k \cdot W_{к.ш.} \cdot dz$ , тоді вираз для визначення сили  $F_2$  прийме вигляд:

$$F_2 = P_z \cdot (h_{2,k} - A_k \cdot dz) \cdot W_{к.ш.} + dP_z \cdot h_{2,k} \cdot W_{к.ш.} \quad (2.26)$$

Підставимо в рівняння (2.26) відповідні формули для всіх сил і розділимо всі члени на добуток  $h_{2,k} \cdot W_{к.ш.} \cdot dz$ , отримаємо:

$$\frac{dP_z}{dz} - P_z \cdot AF = 0, \quad (2.27)$$

$$\text{де } AF = \frac{K_y \cdot W_{к.ш.} \cdot [f_b \cdot \cos(\theta + \varphi_{2,l.}) - f_s] - h_{2,k} \cdot f_s \cdot (K_{xT} + K_{xp}) + A_k \cdot W_{к.ш.}}{h_{2,k} \cdot W_{к.ш.}}. \quad (2.28)$$

Розв'язок диференціального рівняння (2.27) за початкових умов  $P_z = P_1$

при  $z = 0$ , має вигляд:

$$P_z = P_{3.3.} \cdot \exp(AF \cdot z). \quad (2.29)$$

де  $P_{3.3.}$  – тиск у зоні завантаження матеріалу з бункера.

Тиск у зоні завантаження матеріалу з бункера можна визначити за формулою:

$$P_{3.3.} = \left( \frac{h_{\delta,1}}{h_{\delta,0}} \right)^{b_{\phi}} \cdot P_{к.ч.} + \frac{\rho_{н.з.} \cdot g \cdot h_{\delta,1}}{b_{\phi} - 1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{h_{\delta,1}}{h_{\delta,0}} \right)^{b_{\phi} - 1} \right], \quad (2.30)$$

де  $\rho_{н.з.}$  – насипна густина матеріалу;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $b_{\phi}$  – коефіцієнт, що враховує форму бункера і властивості матеріалу;  $P_{к.ч.}$  – тиск, що утворюється на вході в конусну частину бункера за рахунок наявного матеріалу в циліндричній частині.

Для визначення тиску  $P_{к.ч.}$  скористаємося формулою:

$$P_{к.ч.} = \frac{\rho_{н.з.} \cdot g \cdot D_{\delta}}{4 \cdot f_{\omega} \cdot K_{\delta}} \cdot \left[ 1 - \exp\left( \frac{4 \cdot f_{\omega} \cdot K_{\delta} \cdot h_{\delta,2}}{D_{\delta}} \right) \right], \quad (2.31)$$

де  $K_{\delta}$  – коефіцієнт бічного стиснення матеріалу;  $f_{\omega}$  – коефіцієнт тертя на стінці бункера.

Величини  $h_{\delta,0}$ ,  $h_{\delta,1}$ ,  $h_{\delta,2}$ ,  $D_{\delta}$  – геометричні параметри бункера, який представлений на рисунку 2.6.

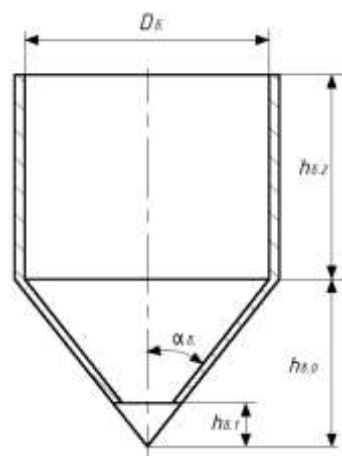


Рисунок 2.6 – Геометричні параметри бункера

Підставивши формулу (2.31) у (2.30) отримаємо величину тиску в зоні

завантаження матеріалу з бункера:

$$P_{3.3.} = \left( \frac{h_{\delta,1}}{h_{\delta,0}} \right)^{b_1} \cdot \frac{\rho_{н.з.} \cdot g \cdot D_{\delta}}{4 \cdot f_{\omega} \cdot K_{\delta}} \cdot \left[ 1 - \exp \left( \frac{4 \cdot f_{\omega} \cdot K_{\delta} \cdot h_{\delta,2}}{D_{\delta}} \right) \right] + \frac{\rho_{н.з.} \cdot g \cdot h_{\delta,1}}{b_{\phi} - 1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{h_{\delta,1}}{h_{\delta,0}} \right)^{b_{\phi} - 1} \right] \quad (2.32)$$

## 2.2. Визначення основних параметрів шнекового екструдера в зоні дозування

При розробці шнекового екструдера для обладнання тривимірного друку акцент було зроблено на його функціональність та універсальність. При цьому враховувалися вимоги до механічних характеристик та стандартів (ДСТУ) [118]. Шнек є основним елементом екструдера. Тому він повинен здійснювати ефективно перетворення твердої полімерної сировини в розплавлену форму та забезпечувати якісну екструзію.

Існує велике різноманіття конструкцій шнеків. Всі вони застосовуються в шнекових екструдерах. Для обладнання тривимірного друку, що використовують гранули чи подрібнені відходи в якості вихідної сировини підходять одношнекові екструдери, які володіють простою конструкцією, надійністю та оптимальним співвідношенням продуктивності до вартості [119].

Тризонні шнеки (рис.2.7, 2.8, а) стали стандартом в багатьох галузях переробки пластиків завдяки своїй ефективній роботі з різноманітними видами полімерних матеріалів. Вони виявляють меншу чутливість до змін у вихідному полімері, який піддається переробці, і забезпечують стабільність у процесі плавлення.

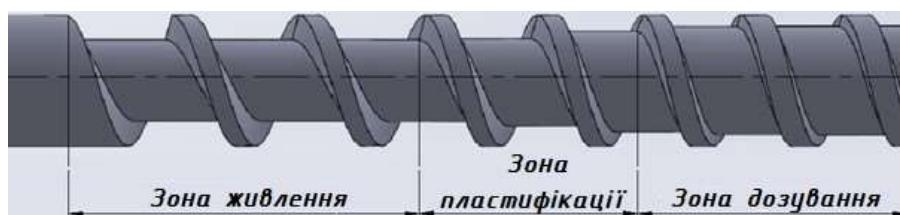


Рисунок 2.7 – Геометрія шнека одношнекового екструдера

В шнековому екструдері фази перетворення полімерного матеріалу теоретично відповідають геометричним сегментам шнека за глибиною канавки, але їхні фактичні межі розходяться. У зоні живлення шнек захоплює гранули матеріалу, які взаємодіють з прохолоднішими частинами шнека порівняно з нагрітою стінкою циліндра. У результаті відбувається плавлення матеріалу та утворення твердої «пробки» з розплавленим шаром біля стінки. У зоні пластифікації «пробка» плавиться за рахунок тепла від внутрішнього тертя та зовнішнього підведеного. Розплавлений шар створює потік, який рухається по шнеку, ефективно змішуючи компоненти та забезпечуючи однорідність розплаву.

Графік приведений на рисунку 2.8, а показує зміну градієнта тиску, спричиненого наявністю сопла, що протидіє потоку розплавленого полімеру, який створюється шнеком. Існує чітка зона стиснення  $L_{з.ст.}$ , де тиск швидко зростає вздовж гвинта. Загальний тиск вздовж шнека дорівнює сумі тисків різних зон:

$$P_{з.т.} = \Delta p_{з.ж.} + \Delta p_{з.ст.} + \Delta p_{з.д.}, \quad (2.33)$$

де  $\Delta p_{з.ж.}$  – тиск у зоні живлення;  $\Delta p_{з.ст.}$  – тиск у зоні стиснення;  $\Delta p_{з.д.}$  – тиск в зоні дозування.

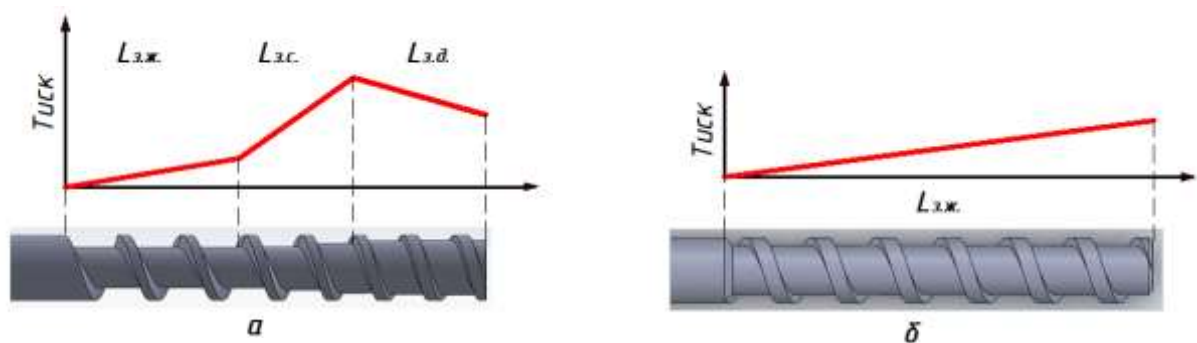


Рисунок 2.8 – Порівняння двох конструкцій гвинта екструдера: *а* – звичайний трисекційний шнек з профілем тиску; *б* – шнекове свердло з профілем тиску

Однією з особливостей тризонних шнеків є потреба в значному обертовому моменті від приводного електричного двигуна. Цей момент

потрібний для створення необхідного тиску та подолання опору тертя під час переміщення матеріалу. У випадку екструдерів, які використовуються у 3D-принтерах, часті запуски та зупинки пристрою можуть призводити до підвищеного навантаження на механізм приводу.

При екструзії термопластичного полімеру за допомогою тризонного шнека може виникати висока температура від стиснення пластику, що ускладнить процес пластифікації. Використання шнека без стиснення, з постійною глибиною каналу та кроком, дасть змогу ефективно переміщувати матеріал до зони нагрівання і видавлювати розплав через сопло, знижуючи обертовий момент і навантаження на електродвигун та його потужність. Однак такий шнек може бути менш продуктивним при переробці певних типів полімерів.

Зменшення тиску в екструдері можна досягти, видаливши зони стискання та дозування. Тому весь шнек стає однією довгою зоною подачі (рис.2.8, б). Тоді:

$$\Delta p_{з.ж} = \frac{dp}{dz} \cdot L_{шн}. \quad (2.34)$$

де  $L_{шн}$  – довжина робочої частини шнека;  $\frac{dp}{dz}$  – градієнт тиску по довжині шнека.

Використання запропонованого типу шнека призведе до зниження тиску всередині екструдера. Згідно з представленим графіком, рівень тиску відчутно корелюється з довжиною шнека. Отже, будь-яке збільшення довжини робочої частини шнека понад мінімально необхідну, може забезпечити тиск, який потрібен для екструзії в 3D-друку. Якщо ж тиск виявляється недостатнім для видавлювання розплавленого полімеру через сопло, можливе вирішення полягає у збільшенні подачі полімерного грануляту. Це спричинить збільшення ефективної довжини зони живлення шнека, що, у свою чергу, підвищить тиск, і розплавлений полімер почне видавлюватися через сопло.

При розробці шнекового екструдера обладнання тривимірного друку

були максимально зменшені його маса та габарити. Це призвело до зниження інерції каретки та підвищення швидкості друку та сприяло економії на вартості координатної системи 3D-принтера через зменшення вимог до її жорсткості.

Для шнекового екструдера, що проектується, вибрано циліндричний однозахідний шнек зі постійним кроком. Через малі габаритні розміри пристрою зона дегазації відсутня. Такі шнеки відзначаються високою продуктивністю, але є більш складними у виготовленні.

Для переробки полімерів у вигляді гранул або подрібнених відходів розроблено шнек із змінною глибиною гвинтового каналу. Конструкція шнека з постійним кроком та змінною глибиною нарізки зображена на рисунку 2.9.

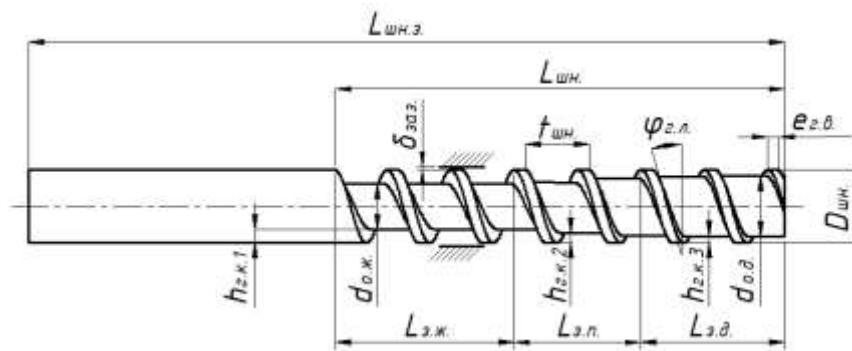


Рисунок 2.9 – Шнек з постійним кроком та змінною глибиною гвинтового каналу

Основні геометричні параметри шнека з постійним кроком та змінною глибиною гвинтового каналу: діаметр  $D_{\text{шн}}$ ; загальна довжина  $L_{\text{шн.з}}$ ; довжина робочої частини  $L_{\text{шн}}$ ; крок гвинтової нарізки  $t_{\text{шн}}$ ; глибина гвинтового каналу по зонах (глибина нарізки)  $h_{\text{г.к.}}$ ; ширина гребеня витка  $e_{\text{г.в.}}$ ; величина зазору між гребенем шнека та внутрішньою стінкою матеріального циліндра  $\delta_{\text{з.з.}}$ ; кут підйому гвинтової лінії нарізки шнека  $\varphi_{\text{г.л.}}$ ; кількість зон  $n_{\text{зон}}$ ; довжина зони живлення  $L_{\text{з.ж.}}$ ; довжина зони пластифікації  $L_{\text{з.п.}}$ ; довжина зони дозування  $L_{\text{з.д.}}$ ; число заходів нарізки шнека  $\lambda_{\text{зах.}}$  (найчастіше  $\lambda_{\text{зах.}} = 1$ ).

Для переробки певних видів полімерів методом екструзії, було розроблено шнек з постійним кроком та постійною глибиною гвинтового

каналу (із постійною глибиною нарізки). Конструкція шнека представлена на рисунку 2.10.

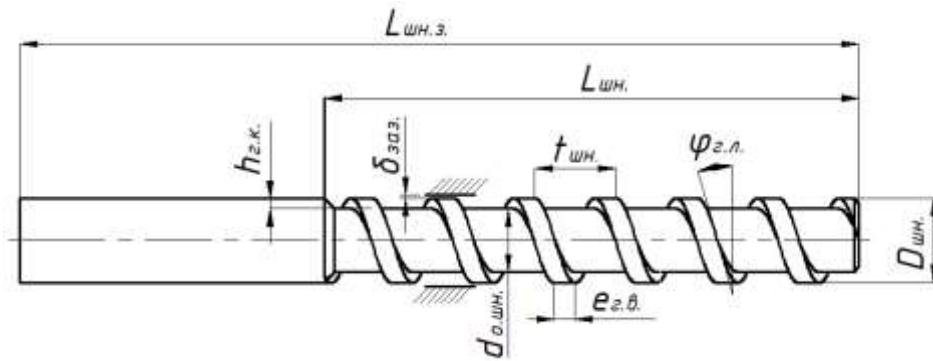


Рисунок 2.10 – Шнек з постійним кроком та постійною глибиною гвинтового каналу

Основні геометричні параметри шнека з постійним кроком та змінною глибиною гвинтового каналу: діаметр  $D_{шн.}$ ; діаметр осердя шнека  $d_{о.шн.}$ ; загальна довжина  $L_{шн.з.}$ ; довжина робочої частини  $L_{шн.}$ ; крок гвинтової нарізки  $t_{шн.}$ ; глибина гвинтового каналу (глибина нарізки)  $h_{з.к.}$ ; ширина гребеня витка  $e_{з.в.}$ ; величина зазору між гребенем шнека та внутрішньою стінкою матеріального циліндра  $\delta_{з.з.}$ ; кут підйому гвинтової лінії нарізки шнека  $\varphi_{з.л.}$ ; число заходів нарізки шнека  $\lambda_{зах.}$  (найчастіше  $\lambda_{зах.} = 1$ ).

Використання зазначених однозахідних шнеків (рис.2.8, 2.9) призвело до зменшення масогабаритних характеристик, що відбилося на вартості виготовлення шнекового екструдера.

Розрахунок діаметра шнека.

Діаметр шнека  $D_{шн.}$  відіграє ключову роль у визначенні продуктивності екструдера. Існує пряма залежність між діаметром шнека та продуктивністю екструдера  $Q_{ек.}$ : з підвищенням діаметра шнека зростає і продуктивність устаткування.

Стандартизовані діаметри шнеків для європейських та вітчизняних екструдерів варіюються з певним кроком від 20 мм до 630 мм, в той час як азійські мають діаметри від 25 мм до 150 мм. Згідно до європейської



класифікації, екструдери з діаметром шнека менше 32 мм вважаються лабораторними, а для високошвидкісних екструдерів із прямим приводом типові діаметри становлять 20-130 мм.

Довжина шнека  $L_{\text{шн.}}$  характеризується її відношенням до діаметра шнека  $D_{\text{шн.}}$  ( $L_{\text{шн.}} / D_{\text{шн.}}$ ). Це співвідношення може змінюватися в широкому інтервалі від 8 до 40. Значення  $D_{\text{шн.}}$  та  $L_{\text{шн.}} / D_{\text{шн.}}$  є основними характеристиками одношнекового екструдера.

На сьогодні в Україні та світі відсутнє промислове виготовлення шнеків для екструдерів, які можна використати в 3D-принтерах. Ті, що спроектовані та виготовлені, застосовуються в експериментальних зразках екструдерів обладнання тривимірного друку для різних галузей.

Завдання розробки та створення компактних шнеків для обладнання тривимірного друку, що мають відносно невелику масу і габаритні розміри, є дуже актуальним.

В якості вихідного параметру для розрахунку геометрії шнека задається або розраховується його діаметр  $D_{\text{шн.}}$ .

Лінійна продуктивність шнекового екструдера 3D-принтера визначається кількістю розплавленого полімеру, який видавлюється через сопло протягом однієї секунди, і залежить від діаметра насадки.

Лінійну продуктивність шнекового екструдера  $Q_{\text{л.пр.}}$  можна визначити за наступною формулою:

$$Q_{\text{л.пр.}} = \frac{Q_{\text{о.пр.е.}}}{S_{\text{с.}}}, \quad (2.35)$$

де  $Q_{\text{о.пр.е.}}$  – об'ємна продуктивність екструдера;

$S_{\text{с.}}$  – площа поперечного перерізу сопла.

Оскільки шнековий екструдер буде інтегровано у 3D-принтер, призначений для друку полімерним філаментом, ключовим параметром для розрахунків стає максимальна швидкість екструзії (або швидкість друку)  $v_{\text{ек.}}$ . Важливо, щоб лінійна продуктивність екструдера перевищувала цю

максимальну швидкість друку, яка вказана у технічних специфікаціях 3D-принтера.

Об'ємна продуктивність принтера розраховується за формулою:

$$Q_{o.pr.e.} = v_{ек.} \cdot S_c, \quad (2.36)$$

де  $v_{ек.}$  – швидкість екструдера.

Площа поперечного перерізу сопла визначається за формулою:

$$S_c = \frac{\pi d_c^2}{4}. \quad (2.37)$$

Підставивши рівняння (2.37) в (2.36) отримаємо:

$$Q_{o.pr.e.} = v_{ек.} \cdot \frac{\pi d_c^2}{4}. \quad (2.38)$$

З іншої сторони продуктивність екструзійної машини  $Q_{e.m.}$  можна розрахувати за залежністю:

$$Q_{e.m.} = 0,68 D_{ин.}^{2.5}. \quad (2.39)$$

Прирівнявши ліві сторони рівнянь (2.38) і (2.39) та зробивши необхідні перетворення було визначено діаметр шнека екструдера  $D_{ин.}$  3D-принтера:

$$D_{ин.} = \sqrt[2.5]{\frac{v_{ек.} \cdot \pi \cdot d_c^2}{0,68 \cdot 4}}. \quad (2.40)$$

Визначення довжини шнека.

Довжина шнека  $L_{ин.}$  є такою ж важливою характеристикою, як і його діаметр  $D_{ин.}$ , і вона кратна діаметру. Довжина шнека здійснює вирішальний вплив на ефективність змішування полімеру, на виконання операцій пластифікації та гомогенізації. Її збільшення призводить до покращення змішувального ефекту. Однак занадто велика довжина шнека може підвищити ризик його вигину під дією навантажень, що виникають під час переробки полімеру. Цей фактор може вплинути на його міцність та призвести до поломки.

Довжина шнека екструдера залежить від марки полімерного матеріалу, який піддається екструзії. Вона може змінюватися відповідно до вимог в межах

$(15...40) \cdot D_{\text{шн.}}$ . При збільшенні довжини шнека також збільшується потужність електричного приводу екструдера, і це зростання майже лінійне.

В технічній літературі відсутня інформація стосовно співвідношення  $L_{\text{шн.}} / D_{\text{шн.}}$  для мікро екструдерів, що можуть використовуватися в 3D-принтерах. Виходячи з конструктивних міркувань та аналізу інформації щодо застосування шнеків у різних типах машин для лиття під тиском та екструзії, було визначено, що це співвідношення може лежати в межах  $L_{\text{шн.}} / D_{\text{шн.}} = 8...15$ .

Визначення загальної довжини шнека  $L_{\text{шн.з.}}$ .

Загальна довжина шнека визначається за формулою:

$$L_{\text{шн.з.}} = L_{\text{шн.}} + L_{\text{шн.кр.}}, \quad (2.41)$$

де  $L_{\text{шн.кр.}}$  – довжина шнека для закріплення в муфті.

Визначення кроку гвинтової нарізки.

На ефективність роботи шнекового екструдера суттєво впливає крок гвинтової нарізки  $t_{\text{г.н.}}$ . Цей параметр залежить від коефіцієнта тертя між матеріалом та шнеком, стінок матеріального циліндра і типу перероблюваного матеріалу.

Крок гвинтової нарізки  $t_{\text{шн.}}$  для вибраного типу шнека є постійним по його довжині. Для шнеків зі змінною глибиною нарізки, він вибирається із меж:

$$t_{\text{шн.}} = (0,7...1) \cdot D_{\text{шн.}} \quad (2.42)$$

Ширина гребеня витка.

Збільшення ширини гребеня  $e_{\text{г.в.}}$  шнека може призвести до збільшення потужності, що споживається. Навпаки, недостатня ширина гребеня може спричинити витік розплавленого полімеру через зазор між зовнішньою частиною спіралі шнека та внутрішньою поверхнею циліндра. При визначенні оптимальної товщини гребеня важливо враховувати ці аспекти. Рекомендується обирати ширину гребеня витка рівною:

$$e_{\text{г.в.}} = (0,06...0,15) \cdot D_{\text{шн.}} \quad (2.43)$$

Зазвичай для шнеків із діаметром понад 125 мм обирають менші значення

ширини гребеня, у той час як для шнеків діаметром менше 125 мм обирають більші. У розроблюваному шнековому екструдері застосовується короткий шнек, тому збільшення ширини гребеня не суттєво впливає на збільшення витрат потужності і не викликає проблем з екструзією полімеру через зазор між шнеком та матеріальним циліндром. Отже, для розрахунків рекомендується обирати максимально допустиме значення ширини гребеня в діапазоні 0,06...0,15.

Для ефективної роботи шнекового екструдера важливо підтримувати оптимальний радіальний зазор між гребенями нарізки шнека та внутрішньою поверхнею циліндра. Збільшення цього зазору може призвести до погіршення якості продукції та втрат продуктивності. Зменшення зазору, навпаки, допомагає уникнути витікання полімеру та підвищує якість друку на 3D-принтері. Якщо в шнеку утворюється тверда «пробка» з полімерних частинок, витікання матеріалу через зазор між нарізкою та циліндром буде мінімальним, особливо при недостатньо щільному упакуванні часток матеріалу.

Тому рекомендується визначати оптимальний радіальний зазор між зовнішньою поверхнею гребенів нарізки шнека та внутрішньою поверхнею матеріального циліндра екструдера у межах:

$$\delta_{\text{зас.}} = (0,02...0,005)D_{\text{ин.}} \quad (2.44)$$

Кут підйому гвинтової лінії нарізки шнека.

Для невеликих каналів, які є характерними для шнекових екструдерів 3D-принтерів, у розрахунках кут підйому приймають за зовнішнім діаметром шнека. Тому кут підйому пов'язаний із кроком і залежить від діаметра шнека та може бути описаний залежністю:

$$\varphi_{\text{г.л.}} = \arctg \frac{t_{\text{ин.}}}{\pi \cdot D_{\text{ин.}}} \quad (2.45)$$

Глибина гвинтового каналу шнека.

Ефективність переробки полімерів залежить від конструкції гвинтового каналу, яка формується між внутрішньою поверхнею циліндра та спіралями шнека. Вона впливає на ключові параметри, такі як: подача матеріалу та тиск у

системі. Детальне розуміння цих геометричних характеристик і розумний вибір їх значень є важливим при проектуванні екструдерів та розрахунках їх складових елементів.

Глибина гвинтового каналу  $h_{2.к.}$  в шнеку змінюється в залежності від типу полімеру та його діаметра  $D_{шн.}$ . Глибші нарізки використовуються для переробки м'яких полімерів при низькому тиску, тоді як менші глибини забезпечують краще змішування, але це може призвести до зниження продуктивності та збільшення тиску. Важливо знайти оптимальну глибину каналу для максимізації швидкості переміщення твердого пластику.

В одношнекових екструдерах глибина гвинтового каналу в зоні живлення полімерним матеріалом варіюється в наступних межах:

$$h_{2.к.1} = (0,12...0,32)D_{шн.} \quad (2.46)$$

Глибини гвинтового каналу  $h_{2.к.3}$  шнека у зоні дозування визначається за формулою:

$$h_{2.к.3} = 0,5 \left[ D_{шн.} - \sqrt{D_{шн.}^2 - \frac{4h_{2.к.1}}{i_{ст}} (D_{шн.} - h_{2.к.1})} \right], \quad (2.47)$$

де  $i_{ст}$  – ступінь стиснення матеріалу.

Ступінь стиснення, також відомий як коефіцієнт стиснення, визначається як співвідношення об'єму витка зони живлення шнека, до об'єму витка зони дозування.

Ступінь стиснення можна виразити співвідношенням між двома глибинами, глибиною каналу живлення та глибиною каналу дозування:

$$i_{ст} = \frac{h_{2.к.1}}{h_{2.к.3}} \quad (2.48)$$

Ступінь стиснення трizonного шнека є ключовим параметром при переробці термопластів із різними в'язкопружними властивостями. Це співвідношення зазвичай коливається від 1,5:1 до 4,5:1. Деякі полімери достатньо добре переробляються шнеками зі ступенем стиснення 2,5:1, тоді як інші – зі ступенем стиснення 4:1. В екструдерах найчастіше застосовуються

шнеки загального призначення із співвідношенням приблизно 2,5-3:1. Така конструкція цього робочого органу дозволяє переробляти більш широке коло термопластичних матеріалів.

Проаналізувавши технічну літературу було визначено ступінь стиснення шнека для основних полімерних матеріалів, що використовуються при 3D-друку (табл.Е.1, додаток Е).

Геометрію шнеків в залежності від ступеня стиснення для різних матеріалів (табл.Е.1) було розбито на 3 групи (рис.2.11).

Глибина гвинтового каналу в зоні пластифікації визначається за формулою:

$$h_{з.к.2} = h_{з.к.1} - \frac{h_{з.к.1} - h_{з.к.3}}{L_{шн.}} L_{шн.0}, \quad (2.49)$$

де  $L_{шн.0}$  – довжина шнеку до початку етапу стиснення матеріалу.

Найкращий варіант коли довжина конструктивної зони стиснення співпадає з зоною пластифікації шнека.

Довжина шнеку до початку етапу стиснення матеріалу  $L_{шн.0}$  визначається із виразу:

$$L_{шн.0} = L_{шн.} - L_{н.ч.}, \quad (2.50)$$

де  $L_{н.ч.}$  – довжина напірної частини шнека.

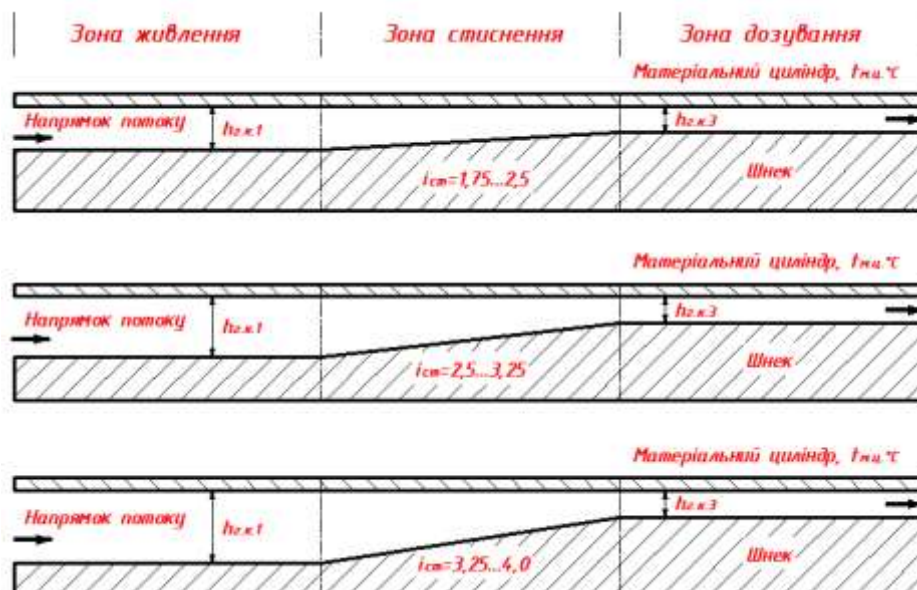


Рисунок 2.11 – Геометрії шнеків з різним ступенем стиснення

Напірна частина шнеку представляє собою зону, що повністю заповнена по його перерізу полімером (матеріал знаходиться в розплавленому стані) та визначається за залежністю:

$$L_{н.ч.} = (0,4...0,5) \cdot L_{шн.} \quad (2.51)$$

Шнеки для переробки полімерних матеріалів можуть бути класифіковані на основі їх властивостей на три основні категорії:

– шнеки для полімерів із великим діапазоном температур пластифікації. Вони можуть мати трохи довшу зону завантаження в порівнянні з зонами стиснення та дозування та повинні забезпечувати ступінь стиснення матеріалу в межах  $i_{cm}=2,0-3,5$ ;

– шнеки для матеріалів із великим діапазоном температур пластифікації та низькою термостабільністю. Зона дозування у них зазвичай відсутня. Довжина зони завантаження аналогічна попередній групі, стиснення може бути трохи більшою. Рекомендований ступінь стиснення матеріалу складає  $i_{cm}=1,5-2$ ;

– шнеки для висококристалічних матеріалів. Вони мають збільшену зону завантаження порівняно з шнеками першої групи, зменшену зону стиснення та подібну зону дозування. Характеризуються максимальним ступенем стиснення матеріалу  $i_{cm}$  від 3 до 4,5.

Оскільки більшість полімерів, що використовуються у 3D-друку (ABS, TPU, PET, PLA, PS, PC тощо) та досліджуються в цій роботі (ABS, TPU, PET) мають відносно широкий температурний інтервал пластифікації, а кристалічні полімери (PET, PLA, PA, PE, PP) не вважаються висококристалічними, для екструдера обладнання тривимірного друку було обрано конструкцію шнека першої групи.

Довжина зон екструдера визначається в залежності від діаметра екструдера  $D_{шн}$  або кроку гвинтової нарізки  $t_{шн}$ . шнека та знаходиться в певних межах, залежно від типів полімерів, які підлягають екструзії. З іншої сторони довжини зон шнека визначаються як відсоток від його загальної (робочої) довжини  $L_{шн}$ . З огляду на це, при проектуванні шнека екструдера для обладнання тривимірного друку, який використовує гранули чи подрібнені

відходи полімеру, було вирішено визначати довжини зон шнека у відсотках від його загальної (робочої) довжини  $L_{\text{шн}}$ .

Проведений аналіз технічної літератури дав змогу визначити межі зон живлення, пластифікації, дозування.

Довжина зони живлення для некристалічних (ABS, TPU, PS) та кристалічних (PET, PLA, PA, PE, PP) полімерів складає:

$$L_{\text{з.ж.}} = (0,48...0,58) \cdot L_{\text{шн}}. \quad (2.52)$$

Довжина зони пластифікації для некристалічних пластиків (ABS, TPU, PS) становить:

$$L_{\text{з.п.}} = (0,25...0,35) \cdot L_{\text{шн}}. \quad (2.53)$$

Для кристалічних пластиків (PET, PA, PE, PP):

$$L_{\text{з.п.}} = (0,22...0,32) \cdot L_{\text{шн}}. \quad (2.54)$$

Для термочувливих пластиків (PVC):

$$L_{\text{з.п.}} = (0,28...0,4) \cdot L_{\text{шн}}. \quad (2.55)$$

Довжина зони дозування для некристалічних пластиків (ABS, TPU, PS) становить:

$$L_{\text{з.д.}} = (0,15...0,58) \cdot L_{\text{шн}}. \quad (2.56)$$

Для кристалічних пластиків (PET, PA, PE, PP):

$$L_{\text{з.д.}} = (0,48...0,58) \cdot L_{\text{шн}}. \quad (2.57)$$

Зона дозування шнека відіграє ключову роль у визначенні продуктивності екструзійного обладнання. Ефективність роботи екструдера залежить від точності розрахунків його геометричних параметрів. Продуктивність екструдера впливає не лише на геометрію шнека та його швидкість обертання, але й на конструкцію та розрахунок формуючої головки (сопла).

Для аналізу взаємодії між шнеком, матеріальним циліндром та перероблюваним полімерним матеріалом у зоні дозування часто застосовують гідродинамічний підхід. Він передбачає розгляд трьох основних потоків руху розплавленого полімеру в каналі шнека: потік розплавленого полімеру в міжвитковому просторі, що рухається вздовж осі шнека від зони живлення до зони дозування, створюється обертанням шнека відносно матеріального



циліндра; протитечія розплаву, що виникає через перепади тиску вздовж робочої довжини шнека, рухається у зворотному напрямку; потік розплавленого полімеру, що виходить через проміжок між зовнішньою поверхнею витків шнека та внутрішньою поверхнею матеріального циліндра, направлений від зони дозування.

У контексті шнекового екструдера обладнання тривимірного друку, можна зробити припущення, що протитечія матеріалу є майже відсутньою через невеликі розміри робочих частин і дуже малі зазори між ними, і цим можна знехтувати при подальших розрахунках. Подача розплавленого полімеру з зони дозування на робочу платформу обладнання тривимірного друку буде залежати лише від опору, який створює формуюча головка (сопло).

За об'ємною продуктивністю  $Q_{\text{ш.е.}}$ , яка залежить від конструкції зони дозування та опору сопла, може бути оцінений шнековий екструдер обладнання тривимірного друку з використанням наступної формули:

$$Q_{\text{ш.е.}} = \frac{A_{\text{н.н.}} \cdot K_{\text{о.с.}}}{K_{\text{о.с.}} + B_{\text{з.н.}} + C_{\text{в.н.}}} \cdot n_{\text{ш.}} \cdot k_{\text{е.е.}}, \quad (2.58)$$

де  $A_{\text{н.н.}}$  – постійна прямого потоку;  $K_{\text{о.с.}}$  – коефіцієнт опору сопла екструдера;  $B_{\text{з.н.}}$  – постійна зворотного потоку;  $C_{\text{в.н.}}$  – постійна потоку полімерного матеріалу, що витікає;  $k_{\text{е.е.}}$  – коефіцієнт ефективності екструзії ( $k_{\text{е.е.}} = 0,8 \dots 0,9$ ).

Під час процесу екструзії в шнековому екструдері можуть виникати різні чинники, що впливають на його реальну продуктивність. Це можуть бути: втрати тиску в екструдері; не ідеальність плавлення полімеру; зміни в температурі; в'язкісні властивості матеріалу та його поведінка при течії тощо. Формула (2.58) не враховувала також температури плавлення полімеру та діаметру подрібнених часток пластику. Все це можна врахувати коефіцієнтом  $k_{\text{е.е.}}$ . Цей коефіцієнт корегує теоретично розраховану продуктивність, адаптуючи її до реальних умов експлуатації. Тому формулу (2.58) було доповнено цим коефіцієнтом.

Значення постійної прямого потоку  $A_{\text{н.н.}}$  визначається за формулою:

$$A_{н.п.} = \frac{\pi^3 \cdot (t_{шн.} - \lambda_{зак.} \cdot e_{з.в.}) \cdot \sigma_{з.н.}}{a_{з.н.} + t_{шн.}^2 \cdot b_{з.н.}}, \quad (2.59)$$

де  $\sigma_{з.н.}$ ,  $a_{з.н.}$ ,  $b_{з.н.}$  – коефіцієнти, що характеризують конструкцію шнека зі змінною глибиною нарізки.

Значення постійної зворотного потоку  $B_{з.п.}$  визначається за формулою:

$$B_{з.п.} = \frac{\pi \cdot t_{шн.} \cdot (t_{шн.} - \lambda_{зак.} \cdot e_{з.в.})}{12 \cdot L_{н.ч.} \cdot (a_{з.н.} + t_{шн.}^2 \cdot b_{з.н.})}. \quad (2.60)$$

Значення постійної потоку матеріалу, що витікає  $C_{в.п.}$  знаходиться за формулою:

$$C_{в.п.} = \frac{\pi \cdot D_{шн.} \cdot \delta_{зак.}^3 \cdot t_{шн.}^2}{10 \cdot e_{з.в.} \cdot L_{н.ч.} \cdot \sqrt{\pi^2 \cdot D_{шн.}^2 + t_{шн.}^2}}. \quad (2.61)$$

Коефіцієнти  $\sigma_{з.н.}$ ,  $a_{з.н.}$ ,  $b_{з.н.}$ , що характеризують конструкцію шнека зі змінною глибиною нарізки визначаються за наступними формулами:

$$\sigma_{з.н.} = 1 - \frac{6,9 \cdot D_{шн.}}{2 \cdot (h_{з.к.2} - h_{з.к.3})} \cdot \lg \frac{h_{з.к.2}}{h_{з.к.3}} + \frac{D_{шн.}^2}{2 \cdot h_{з.к.2} \cdot h_{з.к.3}}, \quad (2.62)$$

$$a_{з.н.} = \frac{\pi^2}{h_{з.к.2} \cdot h_{з.к.3}} \cdot \left[ \frac{D_{шн.} \cdot (h_{з.к.2} + h_{з.к.3})}{2 \cdot h_{з.к.2} \cdot h_{з.к.3}} - 1 \right], \quad (2.63)$$

$$b_{з.н.} = \frac{2,3}{(h_{з.к.2} - h_{з.к.3}) \cdot D_{шн.}^3} \cdot \lg \frac{h_{з.к.2} \cdot (D_{шн.} + d_{о.д.})}{h_{з.к.3} \cdot (D_{шн.} + d_{о.ж.})} + \frac{2 \cdot h_{з.к.2} \cdot h_{з.к.3} + 2 \cdot D_{шн.} \cdot (h_{з.к.2} + h_{з.к.3})}{2 \cdot D_{шн.}^2 \cdot h_{з.к.2}^2 \cdot h_{з.к.3}^2}, \quad (2.64)$$

де  $d_{о.ж.}$  – діаметр осердя (валу) шнека в зоні живлення.

Діаметр осердя (валу) шнека в зоні живлення визначається із співвідношення:

$$d_{о.ж.} = D_{шн.} - 2 \cdot h_{з.к.1}. \quad (2.65)$$

Діаметр осердя (валу) шнека в зоні дозування визначається із виразу:

$$d_{о.д.} = D_{шн.} - 2 \cdot h_{з.к.3}. \quad (2.66)$$

Для того, щоб розрахувати геометричні параметри шнека, необхідно отримати значення коефіцієнтів  $\sigma_{з.н.}$ ,  $a_{з.н.}$ ,  $b_{з.н.}$ .

Підставивши значення коефіцієнтів у формули (2.59), (2.60) і (2.61), розраховуються постійні прямого потоку, зворотного потоку та потоку матеріалу, що витікає:  $A_{n.n.}$ ;  $B_{з.п.}$ ;  $C_{в.п.}$ .

Коефіцієнт опору сопла розраховується за формулами приведеними в пункті 2.3 [45].

Задавши максимальну частоту обертання шнека та підставивши її значення у формулу (2.58), можна визначити максимальну об'ємну продуктивність екструдера. Ця частота залежить від частоти обертання планетарного крокового мотор-редуктора, що служить приводом. Таку систему приводу було обрано для шнекового екструдера, оскільки вона забезпечує значне зусилля на валу електричного приводу при низькій швидкості обертання, що гарантує більш рівномірну та стабільну роботу обладнання.

Для тих шнекових екструдерів, що переробляють не пористі, однорідні полімерні матеріали і не потребують високого тиску для дозування розплавленого полімеру, можна застосовувати шнеки з постійним кроком та глибиною гвинтової нарізки (рис.2.10). У цьому контексті процес розрахунку та виготовлення таких шнеків є значно спрощеним.

Для них діаметр шнека  $D_{шн.}$ , крок гвинтової нарізки  $t_{г.н.}$ , ширина гребеня витка  $e_{г.в.}$ ; величина зазору між гребенем шнека та внутрішньою стінкою матеріального циліндра  $\delta_{з.з.}$ ; кут підйому гвинтової лінії нарізки шнека  $\varphi_{г.л.}$  розраховуються за формулами (2.40, 2.42-2.45). Довжина робочої частини шнека  $L_{шн.}$  знаходиться із співвідношення  $L_{шн.} / D_{шн.} = 8...15$ , а загальна довжина шнека – за формулою (2.41).

Глибина гвинтового каналу  $h_{г.к.}$  залежить від розмірів гранул чи подрібнених відходів полімерного матеріалу, які будуть подаватися в екструдер, а також від зовнішнього діаметру шнека  $D_{шн.}$ . Вона знаходиться з меж:

$$h_{г.к.} = (0,1...0,25) \cdot D_{шн.} \quad (2.67)$$

Максимальний тиск розплаву полімеру  $P_{з.д.макс.}$  в кінці шнеку є одним найважливіших технологічних параметрів, від якого залежить якість екструдату

і продуктивність пристрою. Величину  $P_{з.д.макс.}$  можна наближено розрахувати за наступною формулою:

$$P_{з.д.макс.} = \frac{\pi \cdot D_{ин.} \cdot L_{з.д.} \cdot \eta_{в.р.} \cdot n_{ин.}}{h_{з.к.сер.}^2 \cdot tg\varphi_{з.л.}}, \quad (2.68)$$

де  $\eta_{в.р.}$  – динамічна в'язкість;  $h_{з.к.сер.}$  – середня глибина нарізки каналу в зоні дозування шнека.

Величина  $P_{з.д.макс.}$  перевищує дійсний тиск  $P_{з.д.д.}$  розплаву перед соплом в  $(1,2...1,5)P_{з.д.макс.}$  рази.

Ефективна динамічна в'язкість розплаву  $\eta_{в.р.}$  залежить від величини швидкості зсуву  $\dot{\gamma}$  розплаву в каналі шнека. Величина  $\dot{\gamma}$  визначається за залежністю:

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi^2 \cdot D_{ин.}^2 \cdot n_{ин.}}{60 \cdot \sqrt{\pi^2 \cdot D_{ин.}^2 + t_{ин.}^2}}. \quad (2.69)$$

Знаючи швидкість зсуву розплаву і температуру переробки полімерного матеріалу з номограм, що приводяться в довідниковій літературі, можна визначити ефективну динамічну в'язкість розплаву.

### 2.3. Розробка конструкцій сопел для шнекового екструдера та розрахунок їх коефіцієнту опору

Розробка оптимальної конструкції сопла є ключовим моментом для ефективного, безперебійного та якісного друку.

Загальний коефіцієнт опору  $K_{о.с.}$  є основною геометричною величиною, що характеризує насадку. Він визначається як сума коефіцієнтів опору окремих простих за геометрією ділянок внутрішньої будови сопла за наступною формулою [45]:

$$K_{о.с.} = \frac{1}{\frac{1}{K_{он.1}} + \frac{1}{K_{он.2}} + \dots + \frac{1}{K_{он.i}}}, \quad (2.70)$$

де  $K_{on.1}, K_{on.2} + \dots + K_{on.i}$  – часткові коефіцієнти опору ділянок із простою геометричною формою внутрішнього каналу сопла.

При розрахунку коефіцієнта опору сопло умовно розбивається на ділянки, які відрізняються між собою конфігурацією. В подальшому для кожної ділянки визначається частковий коефіцієнт опору.

Аналіз внутрішньої будови двох найбільш поширених сопел, що використовуються в 3D-принтерах (рис.Г.3, додаток Г) показав, що у них простими геометричними ділянками є циліндричні та конічні круглі канали.

Насадки, що приведені на рисунку 2.12, а та рисунку 2.12, б умовно можна розбити на три ділянки. В першому випадку це буде два циліндричних та один конічний круглий канали, а в другому – три циліндричних круглих канали. Конічними фасками, які утворюються при виготовленні внутрішнього каналу через малі розміри можна знехтувати.

В технічній літературі наводяться формули для визначення коефіцієнтів для різних геометричних форм ділянок каналів. Виходячи з геометричних розмірів сопел, що приведені на рисунку 2.12, визначимо коефіцієнти опору для циліндричних та конічного каналів.

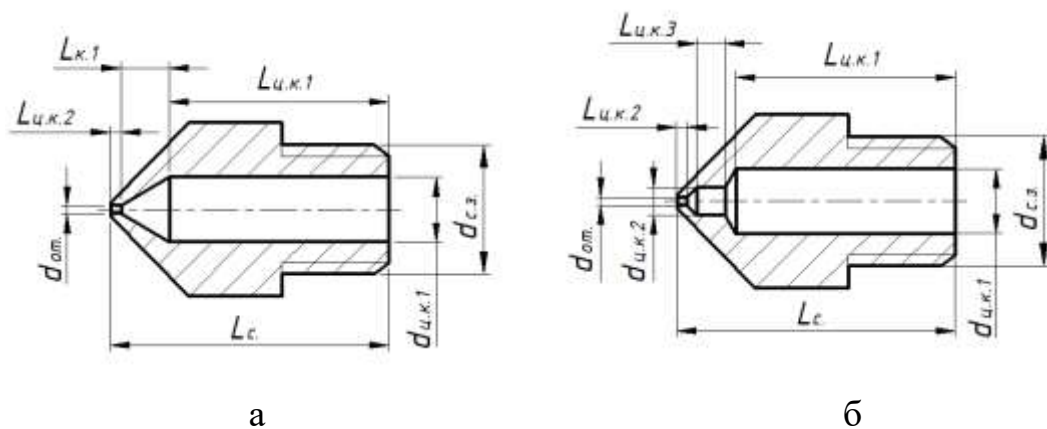


Рисунок 2.12 – Геометричні розміри сопел: *а* – з циліндричним та конічним каналом; *б* – з додатковим циліндричним каналом;  $d_{om.}$  – діаметр вихідного отвору;  $L_c$  – довжина;  $d_{с.з.}$  – зовнішній діаметр;  $d_{ц.к.}$  – діаметр циліндричного каналу;  $L_{ц.к.}$  – довжина циліндричного каналу;  $L_k$  – довжина конічного каналу

Коефіцієнт опору циліндричного круглого каналу визначається за формулою:

$$K_{on.1} = \frac{\pi \cdot d_{ц.к.}^4}{128 \cdot L_{ц.к.}} \quad (2.71)$$

Коефіцієнт опору конічного круглого каналу визначається із виразу:

$$K_{on.2} = \frac{3 \cdot \pi \cdot d_{ц.к.}^3 \cdot d_{om.}^3}{128 \cdot L_{ц.к.} \cdot (d_{ц.к.}^2 + d_{ц.к.} \cdot d_{om.} + d_{om.}^2)} \quad (2.72)$$

Процес 3D-друку можна розглядати як протікання розплавленого полімеру в осесиметричному каналі. Прикладом подібних процесів може бути виготовлення циліндричних стержнів, синтетичних волокон тощо. Подібні канали використовуються в соплах литтєвих машин, решітчастих фільтрах, що встановлюються перед формуючими пристроями. Філь'єрні канали можуть бути циліндричними, конічними або складовими конічно-циліндричними.

Здебільшого в сучасному литтєвому обладнанні перед циліндричною частиною розміщується конфузор, завдяки якому в робочому діапазоні параметрів переробки вдається уникнути застійних зон біля входу в канал, що зменшує спотворення екструдату на виході з філь'єри.

Розплави полімерів зазвичай є високов'язкими рідинами з сильною залежністю в'язкості від температури і при їх течінні важливу роль відіграють теплообмінні і дисипативні ефекти. Градієнти температур тут можуть досягати декількох десятків градусів на міліметр, і при протіканні в каналах це приводить до суттєвої зміни профілю швидкості, який може набути характерного стержнеподібного вигляду. Таке стержневе протікання зменшує спотворення форми екструдату, що видавлюється, але надмірне підвищення температури може привести до деструкції полімеру. Тому при конструюванні сопла екструдера обладнання тривимірного друку необхідний підбір його оптимальних конструкторських і технологічних параметрів.

Екструзійна головка в литтєвій машині призначена для розподілу розплаву полімеру в каналі таким способом, щоб екструдат виходив із

однаковою швидкістю. Розподіл швидкості потоку буде залежати від наступних чинників: реологічних властивостей полімеру, геометрії каналу, швидкості течії через філь'єру, а також температурного поля головки. Якщо геометрія каналу оптимальна для конкретного полімерного матеріалу за таких умов, то навіть незначна зміна температури або швидкості можуть зробити передбачувану геометрію неоптимальною. За винятком круглих філь'єр, принципово неможливо реалізувати таку геометрію каналу, яка однаково добре підходила б для широкого ряду полімерів за різних умов переробки. Для полегшення вирішення проблем, що виникають, всередину головки вводять регулюючі механізми, за допомогою яких розподіл швидкості в процесі роботи екструдера можна змінювати примусово.

Розподіл швидкості можна змінювати двома способами: зміною геометрії каналу за допомогою заслінок, обмежувачів, клапанів тощо; зміною температури всередині головки.

В соплі шнекового екструдера з діаметром шнека до 10 мм через його невеликі геометричні розміри введення регулюючих механізмів є неможливим. Тому розподіл швидкості можна забезпечити тільки зміною температури всередині головки за рахунок регулювання температури нагрівального елемента, що кріпиться ззовні насадки.

При конструюванні сопла для шнекового екструдера слід врахувати наступні рекомендації: відсутність зон застою у каналі; поступове збільшення швидкості вздовж каналу; простота монтажу та демонтажу; геометрична форма каналу не повинна мати різких змін тощо. У багатьох випадках навіть невеликі зміни конструкції можуть суттєво покращити умови екструзії.

Було запропоновано використати в шнековому екструдері, що використовує гранули чи подрібнені відходи полімеру в якості вихідної сировини конструкції сопел приведені на рисунку Г.3 (додаток Г). На основі них та з врахуванням зазначених вище рекомендацій було розроблено конструкцію насадки, яка представлена на рисунку 2.13. Ця насадка має три ділянки: одну конічну та дві циліндричних круглих ділянки (рис.2.14).

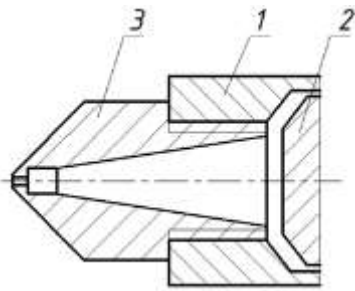


Рисунок 2.13 – Конструкція сопла:  
1 – матеріальний циліндр; 2 – шнек;  
3 – сопло

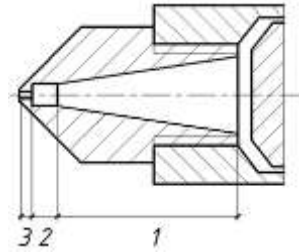


Рисунок 2.14 – Схематичне зображення сопла шнекового екструдера: 1 – конічна ділянка; 2, 3 – циліндрична ділянка

Наявність конічної частини зменшить тертя матеріалу об стінки сопла, а це приведе до зменшення його загального коефіцієнту опору.

Задана орієнтація макромолекул полімеру може бути забезпечена цілеспрямованою течією потоку розплаву. При литві під тиском це досягається місцем розміщення впускного литникового каналу, а при екструзії – конструкцією формуючої головки. Тому наявність у запропонованій конструкції сопла додаткового циліндричного каналу буде також сприяти тому, що макромолекули будуть орієнтуватися вздовж напрямку течії (вздовж вісі каналу) полімерного матеріалу і надрукований виріб буде мати більшу міцність в цьому напрямку.

Використовуючи формули (2.71) і (2.72) можна розрахувати коефіцієнти опору циліндричних та конічної ділянок сопла. Підставивши отримані значення у формулу (2.70) отримується загальний коефіцієнт опору сопла  $K_{o.c.}$  запропонованої конструкції.

При використанні шнека з діаметром більше 10 мм збільшуються габаритні розміри матеріального циліндра. Тому з'являється можливість змінити геометрію каналу, використовуючи дорн. Типи каналів в формуючих головках екструдера з діаметром шнека більше 10 мм обладнання тривимірного друку можуть бути конічними кільцевими, круглими кільцевими. Сопло може комплектуватися елементом фільтрації, який призначений для очищення розплаву від різноманітних твердих включень, які можуть потрапити у полімерний матеріал на



різних стадіях його виготовлення та транспортування. Причиною забивання фільтра також може бути неповне розплавлення полімеру у каналі шнека. Частки матеріалу можуть з'явитися на виході із зони дозування екструдера. Для вловлювання твердих включень використовують сито-змінні фільтруючі системи, що складаються із сіток і підтримуючих решіток. Такий фільтрувальний пристрій встановлюється між матеріальним циліндром і соплом та використовується для спрямування потоку розплаву, який видавлюється з останнього витка шнека. При розрахунку загального коефіцієнту опору формуючої головки необхідно враховувати опір фільтра та решітки.

Замість сито-змінної фільтруючої системи можна встановити визначеної товщини вкладиш у вигляді перфорованої перегородки з проникаючими мікропорами (рис.2.15, а), які розміщені на певній відстані одна від одної (рис.2.15). Перфорована перегородка з однієї сторони буде виконувати роль фільтра, з іншої сторони буде сприяти тому, що макромолекули будуть орієнтуватися вздовж напрямку течії (вздовж вісі мікропор) полімерного матеріалу і надрукований виріб буде мати більшу міцність.

При використанні традиційних насадок (рис.2.12, 2.13) вкладиш з пористої металокераміки (рис.2.15, б) можна вмонтувати у саме сопло.

На основі проведеного аналізу внутрішньої будови сопел для 3D-принтерів, що друкують філаментом та формуючих пристроїв обладнання для переробки полімерів, було розроблено конструкцію насадки з вихідним отвором більше 1,2 мм та використанням дорна для екструдера з діаметром шнека більше 10 мм (рис.2.16). Ця насадка має п'ять ділянок (рис.2.17).

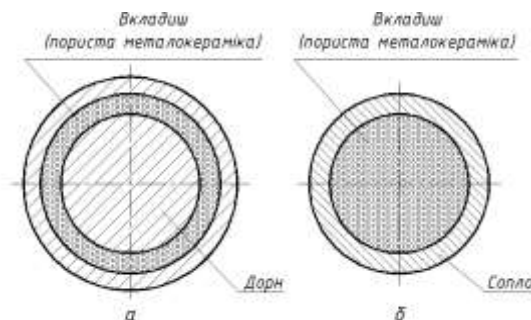


Рисунок 2.15 – Конструкція формуючої головки з вмонтованим металекерамічним пористим вкладишем: *а* – у дорн; *б* – у сопло

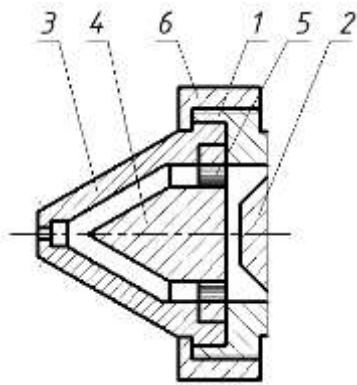


Рисунок 2.16 – Конструкція сопла: 1 – матеріальний циліндр; 2 – шнек; 3 – сопло; 4 – дорн; 5 – елемент фільтрації; 6 – фіксуюча кришка

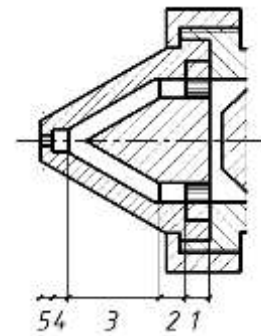


Рисунок 2.17 – Схематичне зображення сопла шнекового екструдера: 1 – ділянка елемента фільтрації; 2 – циліндрична кільцева ділянка; 3 – конічна кільцева ділянка; 4, 5 – циліндричний круглий канал

Для зазначених типів каналів коефіцієнти опору розраховуються за іншими формулами, що приводяться в технічній літературі. Геометричні розміри розробленого сопла з дорном наведено на рисунку 2.18.

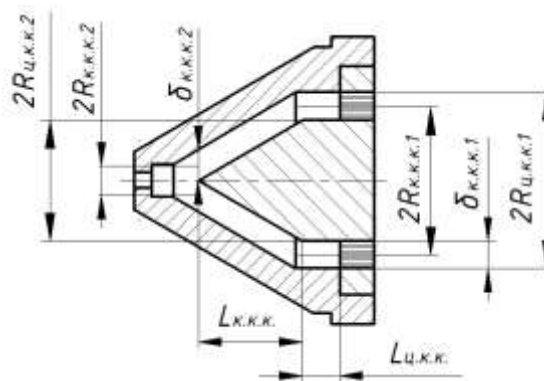


Рисунок 2.18 – Геометричні розміри сопла з дорном:  $R_{ц.к.к.1}$  – зовнішній радіус циліндричного кільцевого каналу;  $R_{к.к.к.2}$  – внутрішній радіус циліндричного кільцевого каналу;  $L_{ц.к.к.}$  – довжина циліндричної кільцевого каналу;  $R_{к.к.к.1}$  – середній радіус конуса на вході;  $R_{к.к.к.2}$  – середній радіус конуса на виході;  $\delta_{к.к.к.1}$  – зазор конічного кільцевого каналу на вході;  $\delta_{к.к.к.2}$  – зазор конічного кільцевого каналу на виході;  $L_{к.к.к.}$  – довжина конічного кільцевого каналу

Коефіцієнт опору циліндричного кільцевого каналу визначається за формулою:

$$K_{оп.3} = \frac{\pi}{8 \cdot L_{ц.к.к.}} \cdot \left[ R_{ц.к.к.1}^4 - R_{ц.к.к.2}^4 - \frac{(R_{ц.к.к.1}^2 - R_{ц.к.к.2}^2)^2}{\ln \frac{R_{ц.к.к.1}^2}{R_{ц.к.к.2}^2}} \right] \quad (2.73)$$

Коефіцієнт опору конічного кільцевого каналу визначається за формулою:

$$K_{оп.4} = \frac{\pi(R_{к.к.к.1} \cdot \delta_{к.к.к.1} - R_{к.к.к.2} \cdot \delta_{к.к.к.2})}{6 \cdot L_{к.к.к.} \cdot m_{з.п.}}, \quad (2.74)$$

де  $m_{з.п.}$  – коефіцієнт, що враховує геометричні параметри.

Цей коефіцієнт визначається за наступною формулою:

$$m_{з.п.} = \frac{2,3 \cdot (R_{к.к.к.1} - R_{к.к.к.2})^2}{(R_{к.к.к.1} \cdot \delta_{к.к.к.2} - R_{к.к.к.2} \cdot \delta_{к.к.к.1})} \cdot \lg \frac{R_{к.к.к.1} \cdot \delta_{к.к.к.2}}{R_{к.к.к.2} \cdot \delta_{к.к.к.1}} - \frac{(R_{к.к.к.1} - R_{к.к.к.2}) \cdot (\delta_{к.к.к.1} - \delta_{к.к.к.2})}{(R_{к.к.к.1} \cdot \delta_{к.к.к.2} - R_{к.к.к.2} \cdot \delta_{к.к.к.1}) \cdot \delta_{к.к.к.1} \cdot \delta_{к.к.к.2}} - \frac{\delta_{к.к.к.1}^2 - \delta_{к.к.к.2}^2}{2 \cdot \delta_{к.к.к.1}^2 \cdot \delta_{к.к.к.2}^2}. \quad (2.75)$$

В залежності від вихідних даних значення  $m_{з.п.}$  може мати від'ємне значення.

Визначивши коефіцієнти опорів ділянок за формулою (2.70) можна розрахувати загальний коефіцієнт опору запропонованої конструкції сопла.

#### 2.4. Розрахунок потужності приводу шнекового екструдера

Розрахунок потужності приводу для шнекового екструдера обладнання тривимірного друку є критично важливим з декількох причин:

- електродвигун повинен забезпечити достатньо механічної енергії для обертання шнека в матеріальному циліндрі, де відбувається транспортування, плавлення і видавлювання полімерного матеріалу. Недостатня потужність може призвести до нерівномірної подачі матеріалу та погіршення якості друку;

- правильно розрахована потужність двигуна дозволить мінімізувати

споживання електричної енергії при забезпеченні оптимальної продуктивності екструдера. Занадто потужний електричний двигун збільшить енергоспоживання, в той час як занадто слабкий двигун не зможе ефективно виконувати свою роботу;

– електродвигун, який працює на межі своєї потужності, під час виконання технологічного процесу може перегріватися. Це призведе до його швидкого зносу або навіть виходу з ладу. Розрахунок та вибір двигуна з правильною потужністю допоможе уникнути таких проблем;

– для отримання готових якісних виробів із використанням 3D-друку потрібно підтримувати стабільну і постійну швидкість подачі матеріалу. При високій в'язкості полімеру недостатньо потужний двигун може мати проблеми з підтримкою необхідної швидкості подачі матеріалу.

Загалом, розрахунок приводу та вибір електродвигуна з оптимальною потужністю дозволяє забезпечити високу якість 3D-друку, надійність екструдера, а також ефективне споживання електричної енергії.

Розрахунок потужності приводу включає аналіз навантажень, що виникають при екструзії, швидкості обертання шнека, в'язкості полімеру, а також врахування втрат енергії через механічне тертя та інші фактори.

Було зроблено припущення, що потужність, яка витрачається шнековим екструдером у зоні живлення, йде на переміщення матеріалу в гвинтовому каналі шнека, а в зоні дозування – на зсув матеріалу в зазорі між гребнем шнека і внутрішньою стінкою матеріального циліндра. Інші втрати так як і втрати тиску в соплі враховуються коефіцієнтом корисної дії і неврахованих втрат потужності  $\eta_{e.n.}$ . Виходячи з цього загальна споживана потужність приводу визначається за формулою [117]:

$$N_{пр.} = \frac{N_{з.жс.} + N_{з.д.}}{\eta_{e.n.}}, \quad (2.76)$$

де  $N_{з.жс.}$  – потужність, що витрачається у зоні живлення на подолання сил тертя по поверхні циліндра і шнека;

$N_{з.д.}$  – потужність, що витрачається на зріз полімерного матеріалу в зазорі між вершиною витка і стінкою матеріального циліндра в зоні дозування;

$\eta_{в.н.}$  – коефіцієнт корисної дії і неврахованих втрат потужності під час переміщення матеріалу з зони живлення до сопла,  $\eta_{в.н.} = 0,4 \dots 0,8$ .

Потужність, що витрачається в зоні живлення.

Вираз для визначення потужності в загальному випадку можна записати наступним чином:

$$dN_{з.жс.} = dN_b + dN_s, \quad (2.77)$$

де  $dN_b$ ,  $dN_s$  – елементарна потужність, що витрачається на довжині  $dz$  на подолання сил тертя відповідно по поверхні циліндра і шнека;

$$dN_b = V_p \cdot P_z \cdot f_b \cdot W_{к.ш.} \cdot dz, \quad (2.78)$$

$$dN_s = V_p \cdot P_z \cdot f_s \cdot (W_{к.ш.} + 2 \cdot h_{з.к.}) \cdot dz. \quad (2.79)$$

Підставивши (2.78) і (2.79) в (2.77) отримуємо диференціальне рівняння:

$$dN_{з.жс.} = [V_p \cdot f_b \cdot W_{к.ш.} + V_p \cdot f_s \cdot (W_{к.ш.} + 2 \cdot h_{з.к.})] \cdot P_z \cdot dz. \quad (2.80)$$

З урахуванням (2.29) маємо:

$$dN_{з.жс.} = [V_p \cdot f_b \cdot W_{к.ш.} + V_p \cdot f_s \cdot (W_{к.ш.} + 2 \cdot h_{з.к.})] \cdot P_{з.з.} \cdot \exp(AF \cdot z) \cdot dz. \quad (2.81)$$

Виконуючи інтегрування (2.81) по  $z$  від 0 до  $Z = \frac{L_{з.жс.}}{\cos \varphi}$ , отримаємо

формулу для розрахунку потужності, що витрачається в зоні живлення:

$$N_{з.жс.} = \int_0^{\frac{L_{з.жс.}}{\cos \varphi}} [V_p \cdot f_b \cdot W_{к.ш.} + V_p \cdot f_s \cdot (W_{к.ш.} + 2 \cdot h_{з.к.})] \cdot P_{з.з.} \cdot \exp(AF \cdot z) \cdot dz. \quad (2.82)$$

Після інтегрування і перетворень отримуємо:

$$N_{з.жс.} = [V_p \cdot f_b \cdot W_{к.ш.} + V_p \cdot f_s \cdot (W_{к.ш.} + 2 \cdot h_{з.к.})] \cdot \frac{P_{з.з.}}{AF} \cdot \exp\left(\frac{AF \cdot L_{з.жс.}}{\sin \varphi} - 1\right). \quad (2.83)$$

Величину потужності, що споживається в зазорі між гребнем шнека і внутрішньою стінкою матеріального циліндра в зоні дозування можна визначити за формулою:

$$N_{з.д.} = \frac{10^{-4} \cdot \pi^3 \cdot D_{ин.} \cdot e_{з.в.} \cdot L_{з.д.} \cdot \eta_{в.р.} \cdot n_{ин.}^2}{36 \cdot \delta_{зав.} \cdot t_{ин.}} \quad (2.84)$$

Підставивши у (2.76) формули (2.83) і (2.84) отримаємо вираз для визначення потужності приводу шнекового екструдера обладнання тривимірного друку:

$$N_{пр.} = \frac{\left[ V_p \cdot f_b \cdot W_{к.ш.} + V_p \cdot f_s \cdot (W_{к.ш.} + 2 \cdot h_{з.к.}) \right] \cdot \frac{P_{з.з.}}{AF} \cdot \exp\left(\frac{AF \cdot L_{зжс} - 1}{\sin \varphi_{з.л.}}\right)}{\eta_{в.п.}} + \frac{10^{-4} \cdot \pi^3 \cdot D_{ин.} \cdot e_{з.в.} \cdot L_{з.д.} \cdot \eta_{в.р.} \cdot n_{ин.}^2}{36 \cdot \delta_{зав.} \cdot t_{ин.}} + \frac{10^{-4} \cdot \pi^3 \cdot D_{ин.} \cdot e_{з.в.} \cdot L_{з.д.} \cdot \eta_{в.р.} \cdot n_{ин.}^2}{36 \cdot \delta_{зав.} \cdot t_{ин.}} \quad (2.85)$$

Для розрахунку основних параметрів шнека та потужності приводу шнекового екструдера було складені програми з використанням програмного середовища Mathcad, які наведені в додатку И.

## 2.5. Висновки до другого розділу

1. Здійснено аналіз та розробку моделі екструдера в зоні живлення шнеку, що дало змогу визначити його основні параметри роботи на даній ділянці: продуктивність та тиск у каналі. Отримано математичну модель, що пов'язує об'ємну продуктивність та основні параметри шнека. Формула для визначення тиску в зоні живлення полімерного матеріалу з бункера зв'язує фізичні та геометричні характеристики полімеру з параметрами ємності для подачі, що є ключовим для оптимізації процесу екструзії та однією із складових для визначення загальної споживаної потужності.

2. Виконано аналіз конструктивних параметрів шнека екструдера обладнання тривимірного друку та визначено основні його характеристики. Виділено ступінь стиснення в зоні стиснення шнеку як один із параметрів, що впливає на процес екструзії. Він є різним для полімерних матеріалів та знаходиться у межах 1,75:1 до 4,5:1. Встановлено, що від нього залежить

геометрична форма шнеку та ефективність переробки пластику. Отримані формули для визначення об'ємної продуктивності, тиску та споживаної потужності в зоні дозування, необхідні для оптимізації шнекового екструдера. Остання є складовою для визначення загальної споживаної потужності.

3. На основі рекомендацій, зроблених в першому розділі, були запропоновані нові конструкції сопел для шнекового екструдера. Для поліпшення якості тривимірного друку екструдерів із діаметром шнека до 10 мм рекомендовано стандартні сопла, але зі зміненою внутрішньою будовою, а саме з внутрішнім конічним каналом та додатковою камерою для зменшення неконтрольованого витікання розплавленого полімеру під час екструзії. Для шнеків діаметром більше 10 мм, розроблено формуючі пристрої з дорном та збільшеним вихідним отвором для прискорення виготовлення великих деталей. Введення вкладиша з перфорованою перегородкою забезпечує орієнтацію макромолекул вздовж течії полімеру, підвищуючи міцність надрукованих виробів. Ці розробки відкривають нові можливості для підвищення ефективності та якості друку на обладнанні тривимірного друку зі шнековим екструдером.

4. Отримана залежність, що виведена на основі здійсненого аналізу навантажень, в'язкості полімеру, швидкості обертання шнека та інших основних параметрів, дозволяє розрахувати потужність приводу шнекового екструдера та здійснити вибір крокового двигуна. Правильний її розрахунок забезпечить достатню механічну енергію для обертання шнека, запобігатиме перегріву мотора та мінімізує споживання електроенергії. Складена програма розрахунку з використанням програмного середовища MathCad спрощує процес розрахунку та підвищує точність визначення потужності.

### РОЗДІЛ 3.

## УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ТРИВИМІРНОГО ДРУКУ З ШНЕКОВИМ ЕКСТРУДЕРОМ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

### 3.1. Розробка моделі прототипу 3D-принтера з шнековим екструдером для переробки полімерних матеріалів

Для переробки полімерних матеріалів із різними властивостями необхідно розробити та виготовити таке обладнання, яке б могло створювати готові вироби і деталі складної геометричної форми з високою точністю, що важко або неможливо створити традиційними методами.

На основі отриманого деклараційного патенту №142922 на корисну модель «Екструдер для перероблення полімерних матеріалів» [Додаток В], було розроблено прототип шнекового екструдера, що дозволяє друкувати тривимірні деталі та вироби гранулами чи подрібненими відходами полімерних матеріалів, отриманими із відходів швейного та взуттєвого виробництва та 3D-друку [120].

Загальний вигляд шнекового екструдера з приводом представлено на рисунку 3.1 [104, 116].

Принцип роботи зазначеного пристрою полягає в наступному. Гранули або подрібнені відходи полімеру засипаються у бункер 2. Далі матеріал попадає в зону живлення матеріального циліндра екструдера. У зоні живлення матеріал захоплюється шнеком і починає переміщатися вздовж циліндра. В цій зоні відбувається початкове змішування та транспортування матеріалу до наступних зон. У зоні стиснення об'єм, що займає полімер, зменшується, що призводить до його стиснення та підвищення температури. Це допомагає частково розплавити полімер. Остаточо пластик розплавляється за рахунок підведеної теплоти від нагрівального елемента, розміщеного на циліндрі. В останній зоні дозування розплавлений полімер проходить через фінальну стадію гомогенізації та підготовки до екструзії. Тут матеріал досягає бажаної в'язкості



та однорідності. Остаточний підготовлений полімерний розплав витісняється через сопло, розміщене в шнековому екструдері, формуючи тонкі шари, які шар за шаром утворюють кінцевий 3D-об'єкт на робочій платформі принтера.

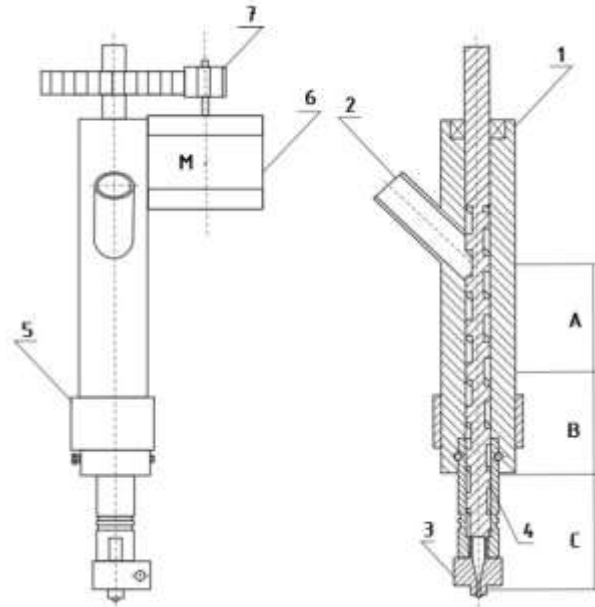


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд шнекового екструдера з приводом: 1 – корпус; 2 – завантажувальний отвір; 3 – сопло; 4 – шнек; 5 – нагрівальний елемент; 6 – кроковий двигун; 7 – зубчаста передача; А – зона живлення; В – зона стиснення, С – зона дозування

Виготовлений шнековий екструдер було встановлено на базі 3D-принтера з FDM-технологією друку власної розробки (рис.3.2).



Рисунок 3.2 – Базова модель 3D-принтера з FDM-технологією друку

В цьому пристрої було демонтовано головку для друку полімерним прутком і встановлено розроблений екструдер для переробки полімерних мас, що поступають в бункер у вигляді гранул чи подрібнених часток (рис.3.3).

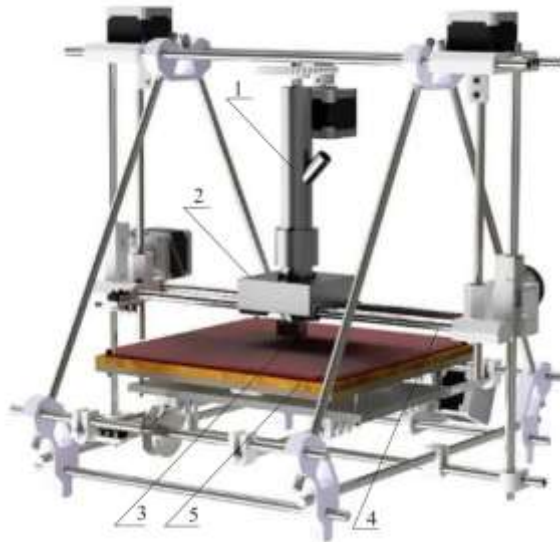


Рисунок 3.3 – Загальний вигляд пристрою з встановленим шнековим екструдером для переробки полімерних мас: 1 – екструдер; 2 – кріплення установки екструдера; 3 – підшипник прямолінійного руху; 4 – вал переміщення пристрою; 5 – робоча поверхня для охолодження вихідного матеріалу

В екструдері було встановлено в якості шнека звичайне свердло по дереву. Корпус був виготовлений із нержавіючої сталі. Розміри матеріального циліндра розраховувалися, виходячи із геометричних розмірів робочого органу. Привід шнека підбирався експериментальним шляхом.

Для забезпечення якісного видавлювання розплавленого полімеру із сопла велике значення мають умови просування твердого матеріалу із зони живлення до інших зон екструдера і заповнення міжвиткового простору в об'ємі шнек – матеріальний циліндр.

Для того, щоб підтвердити працездатність роботи розробленого пристрою та визначити умови просування пластику із зони живлення в зону дозування, було проведено експериментальні дослідження. В якості вихідної сировини

використовувалися подрібнені частки пластику ABS.

Ілюстрація заповнення міжвиткового простору у шнеку полімером представлена на рисунку 3.4.

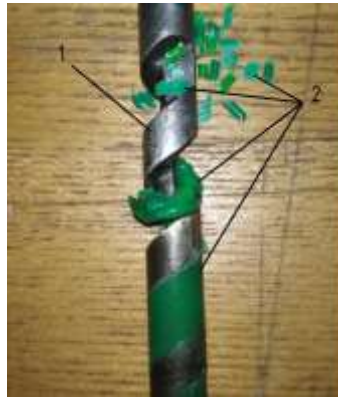


Рисунок 3.4 – Фото заповнення міжвиткового простору у шнеку полімерним матеріалом

Процес перетворення подрібнених часток у полімерну нитку представлено на рисунку 3.5.

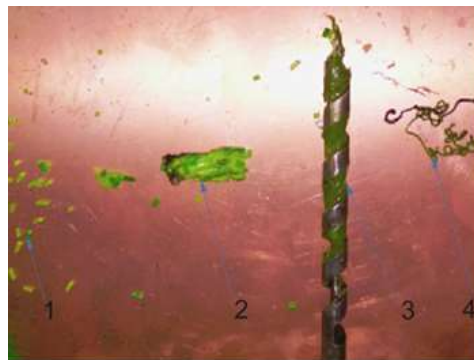


Рисунок 3.5 – Етапи перетворення твердих подрібнених часток у полімерну нитку: 1 – частки, 2 – початок етапу злипання і розплавлення полімерних часток в суцільну масу, 3 – заповнення міжвиткового об'єму шнеку полімером, етап гомогенізації матеріалу, 4 – полімерна нитка після видавлювання

Здійснений аналіз отриманих зразків дав змогу встановити, що при забезпеченні потрібного температурного режиму спочатку утворюється довга пробка із полімеру, яка проштовхується по каналу шнека. Під час цього процесу розплавлений полімер зазнає необхідного нагрівання та змішування. Так забезпечується однорідність матеріалу. Довга пробка з полімерного

матеріалу, що утворилася, виступає буфером, регулюючи температуру і тиск всередині каналу шнека. Це є критично важливим для забезпечення якісного екструзійного процесу.

При обертанні шнека пробка рухається в напрямку сопла. Надалі розплавлений полімер поступово дозується та екструдується через сопло на робочу платформу пристрою для тривимірного друку.

Застосування стандартного свердла як шнека в екструдері підтвердило працездатність пристрою, але виявило низьку його продуктивність. Неоптимальна форма шнека спричиняла появу дефектів у друкованих готових виробках. Для досягнення більшої продуктивності необхідно внести зміни у геометричну форму цього робочого органу. Використання масивного металевого шнекового екструдера збільшило навантаження на систему трикоординатного переміщення обладнання тривимірного друку, що вплинуло на ефективність та збільшило витрати енергії. Це призвело до швидкого зносу механічних частин і збільшило потребу в технічному обслуговуванні цього устаткування.

Для уникнення зазначених недоліків було прийнято рішення про розробку нового шнекового екструдера, який враховує специфіку конструкції обладнання тривимірного друку і має оптимально розраховані габаритні розміри та форму матеріального циліндра, робочого органу шнека та формуючої насадки сопла.

3.2. Розробка шнекового екструдера, що використовує гранули чи подрібнені відходи полімерів в якості вихідної сировини та синхронізація його роботи з обладнанням тривимірного друку

В екструдері 3D-принтера, що друкує гранулами або подрібненими відходами полімеру, як вже зазначалося вище, в якості робочого органу було вибрано шнек. Було спроектовано та виготовлено експериментальний екструдер з використанням обертового шнеку [10].

Першим етапом при його створенні була розробка моделі в програмному середовищі SolidWorks. 3D-модель спроектованого екструдера приведена на рисунку 3.6.

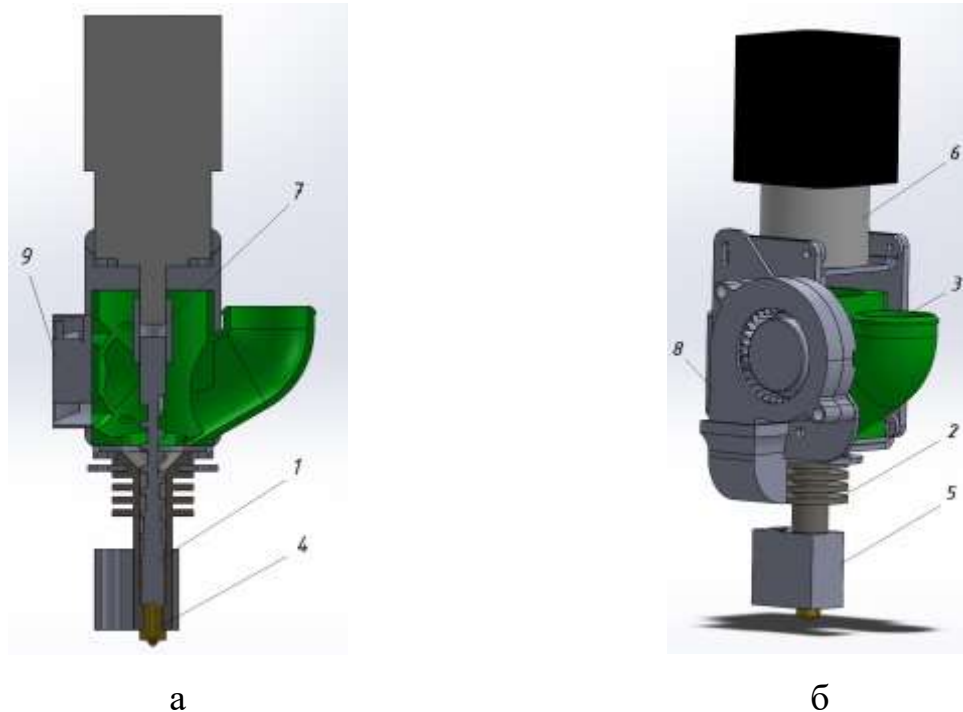


Рисунок 3.6 – Шнековий екструдер: *а* – в розрізі; *б* – загальний вигляд; 1 – шнек; 2 – матеріальний циліндр; 3 – завантажувальний бункер; 4 – сопло; 5 – нагрівальний блок; 6 – мотор-редуктор; 7 – з’єднувальна муфта; 8 – вентилятор обдуву охолоджувальних ребер; 9 – вентилятор обдуву завантажувального бункера

У програмі SolidWorks було спроектовано 3D-модель шнекового екструдера для обладнання тривимірного друку, включаючи основні компоненти: шнек, матеріальний циліндр, бункер, сопло, нагрівальний блок, привід та вентилятори охолодження [10]. Центральна роль шнека у транспортуванні та витісненні розплавленого полімеру вимагала точного моделювання, враховуючи діаметр, крок та глибину каналів для забезпечення ефективної роботи екструдера (додаток II). Застосування інструментів «Helix/Spiral» та «Sweep» дало змогу сформувавши точний профіль шнека.

Паралельно проводилося моделювання матеріального циліндра екструдера. Побудова моделі починалася зі створення основної циліндричної

форми з необхідними розмірами, а також охолоджуючих ребр для розсіювання тепла. Аналіз у SolidWorks допоміг визначити оптимальні розміри та розташування ребер на матеріальному циліндрі для ефективного охолодження.

Розроблена модель матеріального циліндра з ребрами повітряного охолодження в програмному середовищі SolidWorks наведена на рисунку 3.7.

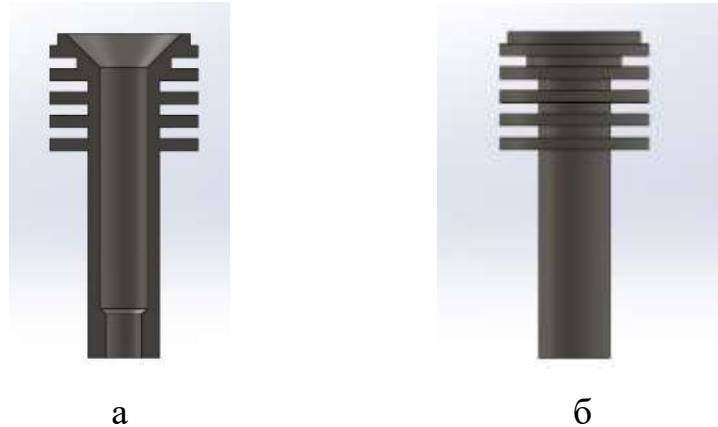


Рисунок 3.7 – Модель SolidWorks матеріального циліндра з ребрами повітряного охолодження: *а* – в розрізі; *б* – суцільна

Бункер для завантаження гранул чи подрібнених часток моделювався з урахуванням вхідних і вихідних отворів та кріпильних елементів для інтеграції з шнековим екструдером. Аналіз напружень і динаміки руху матеріалу в бункері дозволив оптимізувати його форму.

Моделювання сопла включало побудову його 3D-моделі з урахуванням його основних характеристик діаметра, форми та інших параметрів, які впливають на процес виходу в'язкотекучого полімеру із нього.

В програмі також були змодельовані нагрівальний блок і механізм приводу шнека, а також зроблений аналіз теплового розподілу та механічних навантажень.

Більш детально опис процесу моделювання основних деталей цього пристрою описано в роботі [10].

Отже, здійснене детальне моделювання шнекового екструдера в програмному середовищі SolidWorks забезпечило глибоке розуміння його

конструкції та функціональності. Це є важливим фактором при розробці ефективних екструдерів для 3D-друку.

Використовуючи розроблену програму (додаток І), було розраховано споживану потужність приводу шнекового екструдера  $N_{пр.} = 35,28 \text{ Вт}$  та підібрано кроковий двигун з планетарним редуктором Nema 17 17HS24-2104S. Основні технічні характеристики цієї системи приводу наведено в роботі [121].

Крутний момент прикладений двигуном розраховується за формулою:

$$M_{м.р.} = M_{к.д.} \cdot i_{ред.} \quad (3.1)$$

де  $M_{к.д.}$  – утримуючий момент крокового двигуна;

$i_{ред.}$  – передаточне відношення редуктора.

Підставивши значення [121] у формулу (3.1) було розраховано крутний момент  $M_{м.р.} = 3,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Було здійснено розрахунок шнеку екструдера на міцність з використанням програмного середовища SolidWorks Simulation [121]. Використання цього програмного середовища дозволило провести симуляцію процесу заклинювання шнека. Це дало змогу детально вивчити і проаналізувати умови та фактори, які можуть призвести до механічних збоїв у роботі шнека та екструдера в цілому.

В якості навантаження шнекового екструдера виступав вибраний кроковий двигун з планетарним редуктором.

Етапи проведення розрахунку шнека на міцність приведені на рисунках 3.8-3.13.

Етап прикладання крутного моменту та закріплення моделі показано на рисунку 3.8. Зліва на моделі за часовою стрілкою прикладено крутний момент  $M_{м.р.} = 3,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , справа модель жорстко закріплено (зелені стрілки). Надалі задаються характеристики шнека (матеріал сталь 38Х2Н2МА, межа міцності 860 МПа, рис.3.9); здійснюється розбивка моделі на сітку для симуляції (рис.3.10); запускається симуляція.

Отримані результати представлено на рисунках 3.11 – 3.13.

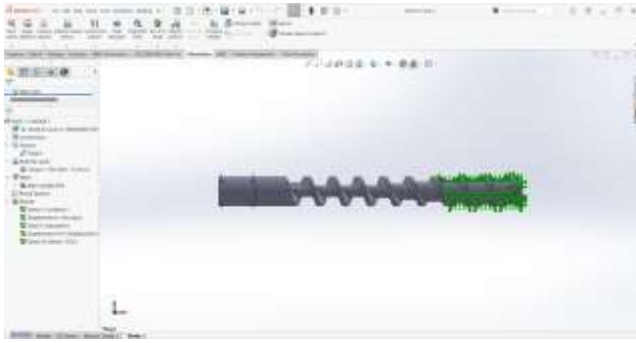


Рисунок 3.8 – Прикладання крутного моменту та закріплення моделі

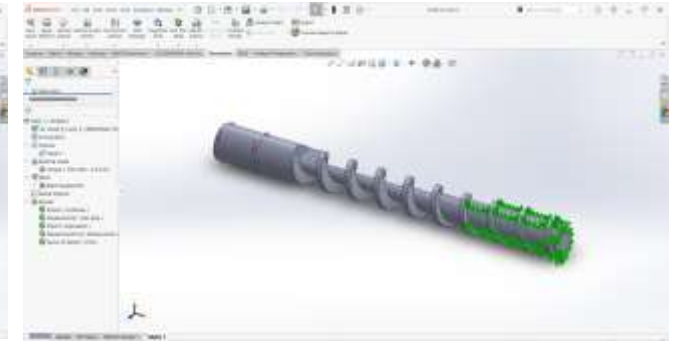


Рисунок 3.9 – Модель із заданими характеристиками

На рисунку 3.11 показані напруження (МПа), що виникають в моделі.

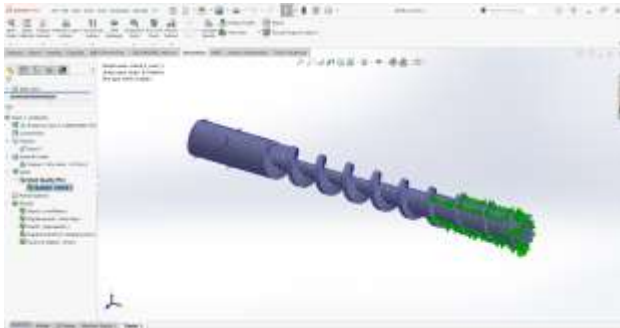


Рисунок 3.10 – Модель із сіткою для симуляції

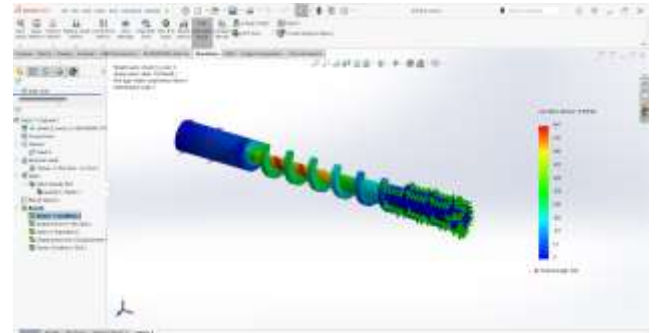


Рисунок 3.11 – Напруження, що виникають в моделі

На рисунку 3.12 зображено еквівалентну деформацію.

Далі розраховано коефіцієнт запасу міцності шнека. Результати розрахунку наведено на рисунку 3.13. За результатами розрахунків коефіцієнт запасу міцності склав  $K_{м.ш.} = 1,41$ . Допускається більше 1.

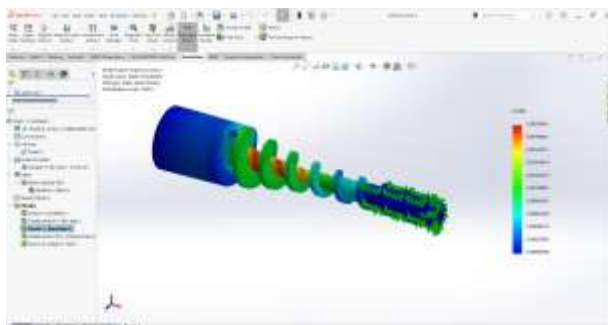


Рисунок 3.12 – Еквівалентна деформація

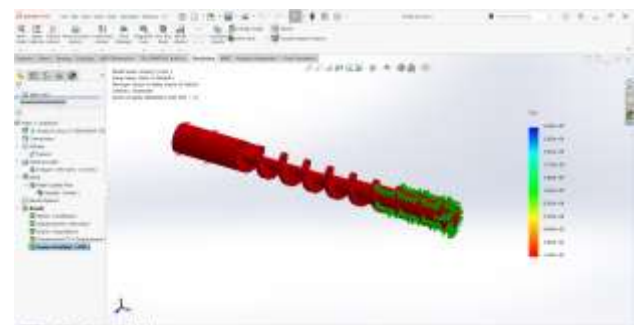


Рисунок 3.13 – Розрахунок коефіцієнта запасу міцності шнека



В подальшому, використовуючи отриману технічну документацію та креслення, було проведено виготовлення спроектованих та підбір стандартних деталей, вибір елементів приводу, нагрівального блоку та системи охолодження.

Було розраховано та виготовлено два типи шнеків: з постійним кроком та змінною глибиною гвинтового каналу: з постійним кроком та постійною глибиною гвинтового каналу.

Було виготовлено три шнеки з постійним кроком і змінною глибиною гвинтового каналу в залежності від ступеня стиснення для різних матеріалів (рис.2.8, 2.9, табл.Е.1, додаток Е) та три шнеки з постійним кроком і постійною глибиною гвинтового каналу. Змінювався тільки внутрішній діаметр шнеку  $d_{o.ж.}$  (рис.2.10). Шнеки представлені на рисунку 3.14.



Рисунок 3.14 – Шнеки для екструдера: *а* – з постійним кроком та змінною глибиною гвинтового каналу; *б* – з постійним кроком та постійною глибиною гвинтового каналу

Загальний вигляд матеріального циліндра з ребрами повітряного охолодження наведено на рисунку 3.15.



Рисунок 3.15 – Загальний вигляд матеріального циліндра

Також було виготовлено сопло, виходячи із запропонованої конструкції (рис.2.12, 2.13). Його загальний вигляд представлено на рисунку 3.16.



Рисунок 3.16 – Сопло для екструдера: *а* – загальний вигляд; *б* – полімерний зліпок внутрішньої будови запропонованої конструкції насадки

Загальний вигляд шнекового екструдера з встановленими компонентами представлено на рисунку 3.17. Розроблений екструдер було встановлено замість екструдера, що друкує філаментом на 3D-принтер Anycubic Mega S з технологією друку FDM китайської компанії Anycubic. Загальний вигляд цього принтера наведено на рисунку К.1 (додаток К).

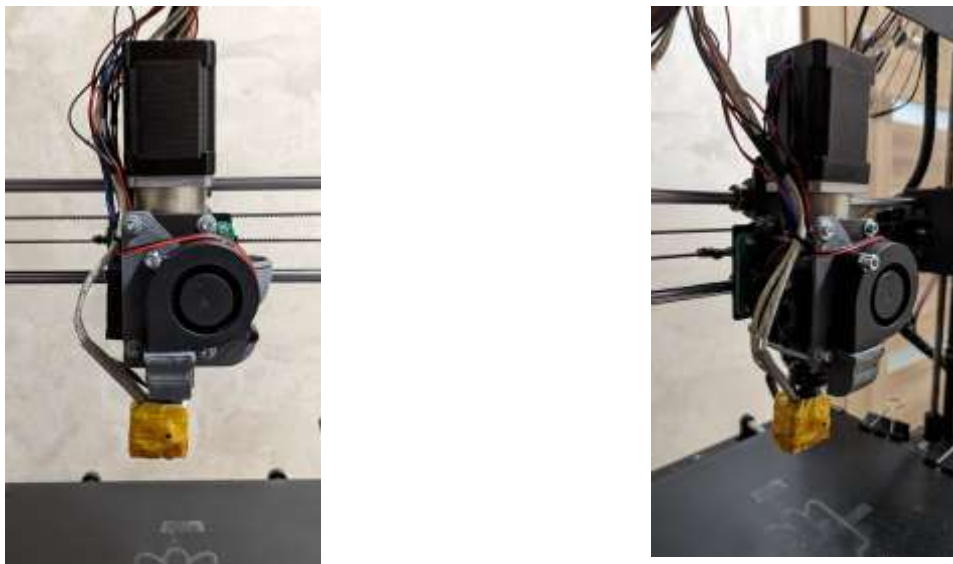


Рисунок 3.17 – Загальний вигляд шнекового екструдера

Цей принтер друкує широким спектром матеріалів, включаючи PLA, ABS, TPU, що будуть використовуватися при дослідженнях.

Технічні характеристики базової моделі 3D-принтера Anycubic Mega S приведені в таблиці К.1 (Додаток К).

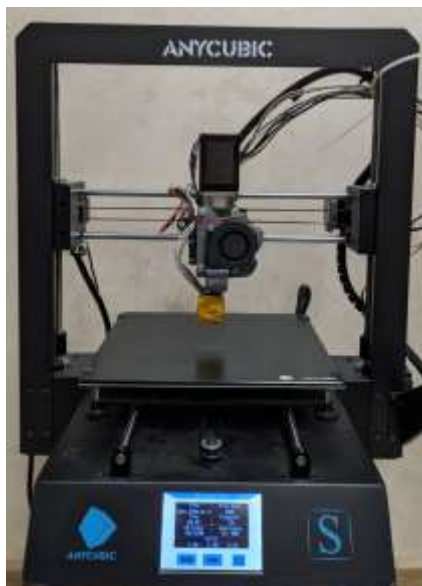
При заміні стандартного філаментного екструдера на шнековий екструдер, який друкує гранулами чи подрібненими відходами полімеру, було синхронізовано роботу основних елементів обладнання тривимірного друку.

Оскільки шнековий екструдер працює з гранулами або подрібненими частками, а не з філаментом, систему подачі матеріалу було перепрофільовано для роботи з ними.

Шнекові екструдери вимагають точного контролю температури для ефективного плавлення гранул. Температурні режими можуть відрізнятися від тих, що використовуються для філаментних екструдерів, тому систему керування температурою було адаптовано під них.

У зв'язку із використанням потужнішого крокового двигуна для приводу шнека та більших його масогабаритних характеристик було внесено корективи для механізмів приводу та крокових двигунів переміщення екструдера по координатах X, Y, Z.

Загальний вигляд 3D-принтера Anycubic Mega S із встановленим шнековим екструдером представлено на рисунку 3.18.



а



б

Рисунок 3.18 – 3D-принтер Anycubic Mega S із встановленим шнековим екструдером: *а* – загальний вигляд; *б* – процес друку деталей (тестовий кубик, шестерня)

Програмне забезпечення принтера, включаючи слайсер та інтерфейс керування, було оновлено та адаптовано, щоб вони могли адекватно обробляти параметри друку шнекового екструдера, включаючи швидкість екструзії, температуру та інші спеціальні налаштування.

### 3.3. Розробка системи охолодження корпусу шнекового екструдера

Під час екструзії полімерних матеріалів, перегрів шнекового екструдера може погіршити якість тривимірного друку та зменшити термін експлуатації обладнання. Цю проблему можна вирішити шляхом використання ефективної системи охолодження, яка може містити вентиляційні системи або рідинне охолодження. Це дозволить регулювати температуру екструдера і підвищити однорідність готових виробів [122].

Під час роботи корпус екструдера обладнання тривимірного друку нагрівається до певної температури. Тепло утворюється за рахунок роботи електронагрівача, який знаходиться в алюмінієвому нагрівальному блоці [123]. Він розміщений в нижній частині матеріального циліндра. Оскільки алюміній є дуже хорошим провідником з теплопровідністю  $209,3 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ , а циліндр/охолоджувач екструдера виготовлено з однієї суцільної металевої заготовки зі сталей 40 або 40X з теплопровідністю  $74,4 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ , то тепло дуже швидко передається з нижньої частини у верхню. Воно також виникає через внутрішні сили тертя, створені рухом шнека всередині циліндричної оболонки. Під час обертання шнека його лопаті переміщують гранульований полімер вздовж ствола, при цьому матеріал треться об корпус циліндра та шнека, що призводить до виділення тепла. Перевищення температури нагрівання корпусу може негативно вплинути на процес екструзії полімеру та виготовлення готового виробу. Гранули полімерів можуть розплавитися під впливом тепла, яке виділяється від екструдера під час роботи.

Охолодження корпусу екструдера є ключовим для попередження передчасного розплавлення полімерного матеріалу та забезпечення стабільної

температури в екструдері, уникнення деформації або пошкодження пластикових часток та забезпечення безпечної роботи пристрою.

Хотенд (англ. hotend) у контексті 3D-друку – це ключова частина екструдера, яка відповідає за нагрівання та розплавлення мононитки до необхідної температури для подальшого її екструдювання через сопло. У шнековому екструдері обладнання тривимірного друку, який використовує гранули або подрібнені відходи полімеру, еквівалентом хотенду є зона плавлення полімеру. Тому в шнековому екструдері ця зона виконує функції хотенда, забезпечуючи нагрівання, плавлення, гомогенізацію та подачу розплавленого полімеру до сопла. Контроль температури зони плавлення необхідний для забезпечення якості друку. Сильна флуктуація може спричинити блокування розплавленого полімеру в кінці екструдера. Це може призвести до виникнення розривів в потоці матеріалу та вплинути на якість виготовлених деталей. Також важливо зменшити кількість тепла, що поступає від гарячого блоку до верхньої частини екструдера. Це дасть змогу уникнути деформацій при підвищених температурах у пластикових деталях, які використовуються в екструзійному блоці.

У першій моделі розробленого екструдера обладнання тривимірного друку, що друкує гранулами або подрібненими відходами полімерів, охолодження корпусу відбувалося за рахунок розміщених на матеріальному циліндрі ребер для охолодження. Охолоджуючі ребра знаходяться на матеріальному циліндрі у верхній частині екструдера (рис.3.15).

Основне їх призначення – це збільшення площі поверхні циліндра у місці надходження полімерного матеріалу у шнек. Таким способом збільшується площа тепловіддачі та підвищується ефективність охолодження. Таке розташування має запобігти потраплянню тепла в бункер і частковому плавленню гранул полімеру, які не потрапили в порожнину між матеріальним циліндром та шнеком. У результаті при роботі з пластиками TPU, ABS, PET, PLA відбувалося злипання матеріалу і блокування його транспортування в зону пластифікації екструдера. В один момент певні пластикові деталі бункера

почали плавитися через велику кількість тепла, що утворилося навколо ребер. Регулювання температурного режиму нагрівача позитивних результатів не принесло. Тому використання металевих ребер було недостатньо ефективним.

В подальшому для поліпшення їхньої тепловіддачі було запропоновано використати потік повітря від вентилятора. Він спрямовує повітря на нагріту деталь обладнання, допомагаючи відводити тепло в навколишнє середовище.

Охолодження екструдера за допомогою потоку повітря від вентилятора є досить ефективним методом і має декілька переваг: розсіювання тепла; зменшення перегріву полімерного матеріалу та збереження його якості, а саме фізичних та хімічних властивостей; забезпечення продуктивності за рахунок стабільної роботи екструдера; можливість керування температурою. За допомогою вентилятора можна регулювати температуру в окремих зонах екструдера, що дозволяє досягти більш точного керування процесом екструзії.

Вентилятор турбінного типу 1 потужністю 1,2 Вт та габаритними розмірами 50x50 мм для обдування ребер було розміщено у верхній частині корпусу екструдера (рис.3.19). Для направлення потоку повітря для обдуву ребер циліндра, з використанням програмного середовища SolidWorks було спроектовано направляюче сопло 2.



Рисунок 3.19 – Екструдер з повітряним охолодженням за допомогою вентилятора: 1 – турбінний вентилятор; 2 – направляюче сопло

При друку гранулами ABS пластику в деяких випадках відбувалося їх злипання. Це призводило до зниження продуктивності екструдера та стабільної його роботи.

Наступні вдосконалення системи охолодження перегрітої частини корпусу екструдера полягали у встановленні додаткового вентилятора, який би спрямовував потік повітря у завантажувальний бункер та додавання теплового бар'єру.

Встановлення теплового бар'єру між матеріальним циліндром екструдера та бункером несе в собі кілька вигод. Використання теплоізоляційного матеріалу мінімізує передачу тепла від корпусу екструдера до бункера, допомагаючи підтримувати стабільну температуру всередині бункера і запобігаючи перегріву матеріалу. Ефективна ізоляція зменшує енерговитрати, необхідні для підтримки температури у матеріальному циліндрі, сприяючи таким чином енергоефективності. Захист від зайвого тепла допомагає зберегти властивості пластику на етапі завантаження, забезпечуючи оптимальні умови для його подальшого транспортування та пластифікації. Тепловий бар'єр оберігає бункер від перегріву, запобігаючи можливим ушкодженням його будови та зниженням терміну служби.

Отже, встановлення ізолюючого прошарку між нагрітим корпусом екструдера та бункером є важливим для забезпечення ефективної та безпечної роботи обладнання і обґрунтованим, оскільки він сприяє зниженню теплопередачі та запобігає передчасному плавленню полімеру та його злипанню в бункері.

В якості бар'єру було вибрано три матеріали: силікон, тефлон та флубон.

Силіконова гума (еластичний полімерний матеріал) володіє високою температурною стійкістю (до 280–300°C), ідеально підходить для високотемпературних застосувань, зокрема в 3D-друці. Політетрафторетилен (PTFE) – матеріал з високою температурною стійкістю та низьким коефіцієнтом тертя, застосовується у бункерах екструдерів. Флубон – композиційний матеріал на основі PTFE з додаванням вуглецевих волокон, розроблений у

Хмельницькому національному університеті. Витримує високі температури без деформації чи розплавлення. Має теплопровідність на рівні природних матеріалів. Може бути використаний як тепловий бар'єр в шнековому екструдері обладнання тривимірного друку. Більш детально властивості зазначених матеріалів описано в роботі [122].

З метою проведення експериментальних досліджень було виготовлено термоізолюючі прокладки (бар'єри) для екструдера обладнання тривимірного друку товщиною 2 мм та габаритними розмірами 37x37 мм. Така товщина обумовлена габаритними розмірами екструдера змодельованого в програмному середовищі SolidWorks.

Прокладку із силікону було виготовлено із силіконової пластини товщиною 20 мм (рис.3.20, а). Термобар'єр з фторопласту 4 було зроблено з фторопластової пластини товщиною 20 мм (рис.3.20, б). Вуглефторопластову прокладку для шнекового екструдера було виготовлено з флубону 15 в лабораторії полімерних композиційних і мастильних матеріалів Хмельницького національного університету (рис.3.20, в).

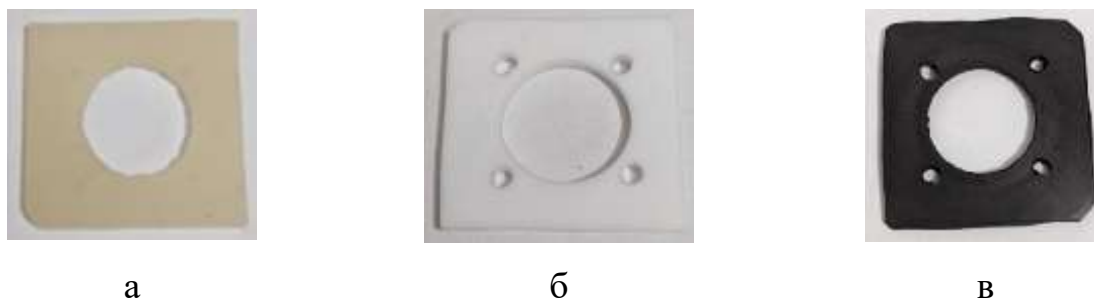


Рисунок 3.20 – Термоізолюючі прокладки: *а* – силіконова гума;  
*б* – фторопласт 4; *в* – флубон 15

З метою визначення того, який із зазначених матеріалів (рис.3.20) має найменшу теплопровідність, було проведено експериментальні дослідження. Їхня суть полягала в наступному. Теплоізоляційні матеріали встановлювалися на робочу платформу 3D-принтера Anycubic 4Max Pro 2.0. Було вибрано саме цю модель принтера у зв'язку з тим, що він має закритий корпус. Наявність



закритого корпусу дає змогу стабілізувати температуру всередині та проводити експериментальні дослідження при сталому режимі нагрівання.

За допомогою налаштувань пристрою було встановлено температуру нагріву  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Теплоізоляційні прокладки розміщувалися на платформі принтера (рис.3.21).



Рисунок 3.21 – Розміщення теплоізоляційних прокладок на платформі 3D-принтера

Після стабілізації температури їх нагріву було проведено вимірювання температури робочого столу та зовнішніх поверхонь кожної із них. Візуальне зображення нагрівання прокладок було знято за допомогою тепловізійної камери Walcom HT-03. Результати вимірювання представлено на рисунку 3.22.

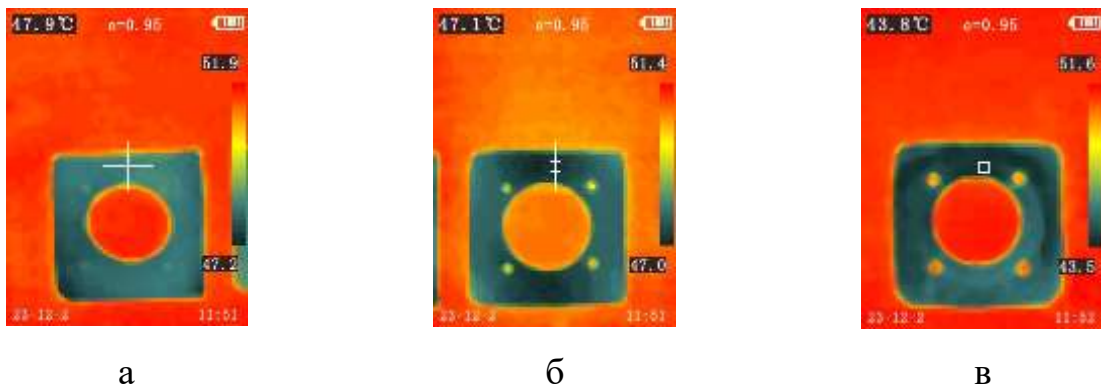


Рисунок 3.22 – Візуальне зображення нагрівання прокладок: *а* – силікон; *б* – фторопласт 4; *в* – флубон 15

Аналізуючи отримані знімки, можна побачити, що температура нагрівального столу в місцях вимірювання коливалася від  $51,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $51,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Температура зовнішніх поверхонь теплоізолюючих прокладок становила: силікон 47,9 °С; фторопласт 47,1 °С; флубон 43,8 °С. Визначивши різницю температур, було встановлено кількість тепла, що затримується у теплобар'єрі: з флубону 7,8 °С; з фторопласту 4,3 °С, з силікону 4,3 °С.

З огляду на це можна зробити висновок про те, що коефіцієнт теплопровідності флубону найменший, хоча в технічній літературі наводиться інформація, що у фторопласта коефіцієнт теплопровідності (0,252 Вт/м·К) менший порівняно з флубоном 15 (0,34...0,37 Вт/м·К). Встановлення кількісних показників коефіцієнта теплопровідності матеріалів не є предметом цієї роботи. Ефективність термобар'єрів із зазначених матеріалів було перевірено на реальному об'єкті – шнековому екструдері.

Загальний вигляд екструдера зі встановленим додатковим вентилятором потужністю 1,2 Вт і габаритними розмірами 40x40 мм наведено на рисунку 3.23, а із термоізолюючою прокладкою на рисунку 3.24.



Рисунок 3.23 – Загальний вигляд екструдера зі встановленим додатковим вентилятором



а



б

Рисунок 3.24 – Загальний вигляд екструдера зі встановленою термоізолюючою прокладкою:

*а* – з фторопласту; *б* – з флубону;

*1* – завантажувальний бункер; *2* – охолоджуючі ребра; *3* – термоізолююча прокладка

Для виконання статичних та перехідних термічних аналізів системи охолодження корпусу шнекового екструдера обладнання тривимірного друку було використано програмне середовище SolidWorks, а саме додатки SolidWorks Simulation та SolidWorks Flow Simulation [122, 124]. SolidWorks Simulation – це потужний інструмент для проведення комплексного аналізу напружень, деформацій, втоми матеріалів, а також термічного аналізу в рамках CAD-середовища SolidWorks.

Такий підхід дозволяє детально вивчити термічні властивості та поведінку кожного варіанту конструкції шнекового екструдера під час експлуатації, забезпечуючи важливу інформацію для його оптимізації.

Статичний термічний аналіз дозволяє зосередитися на оцінці стабільного стану теплопровідності екструдера. Він дає змогу визначити розподіл температури по всій конструкції при певних стабільних умовах, наприклад, коли екструдер працює з постійною температурою протягом тривалого часу.

Перехідний термічний аналіз дозволяє оцінити, як конструкція буде реагувати на зміни температури з часом. Це включає аналіз змін теплопровідності під час розігріву, охолодження та інших динамічних теплових процесів.

За допомогою SolidWorks Simulation було створено моделі охолодження шнекового екструдера з використання матеріального циліндра з ребрами для розсіювання тепла (рис.3.25); з повітряним охолодженням за допомогою вентилятора (рис.3.26), з додатковим повітряним вентилятором та з використанням теплового бар'єру у вигляді прокладки з трьох різних матеріалів: силікон, фторопласт 4, флубон 15 та проведено їх аналіз (рис.3.27-3.29).

Для подальшої теплоізоляції шнекового екструдера нагрівальний елемент було обгорнуто фум-стрічкою та каптоновим скотчем (рис.3.30). Основний компонент матеріалу стрічки – фторопласт-4, який є найбільш щільним серед усіх типів фторопластів і є важкогорючим. Цей матеріал, як вже відмічалось вище, здатний витримувати високі температури.

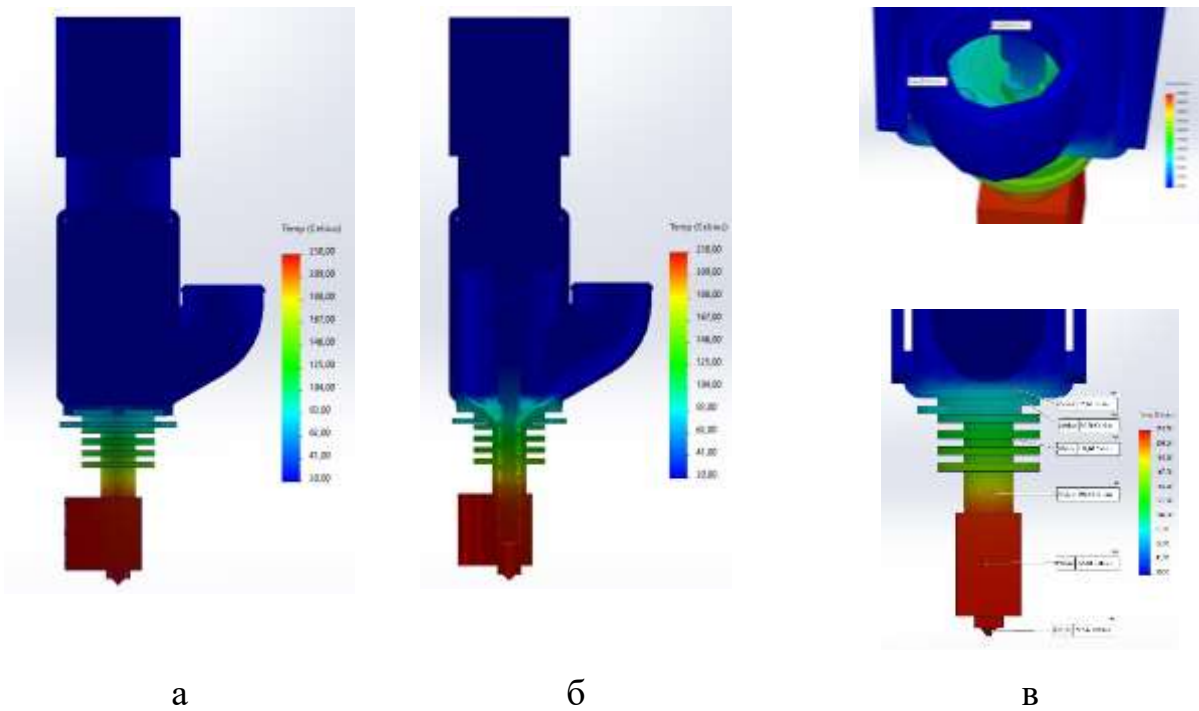


Рисунок 3.25 – Зміна температури в шнековому екструдері при наявності ребер для розсіювання тепла на матеріальному циліндрі: *а* – суцільний; *б* – в розрізі; *в* – значення температури в точках вимірювання

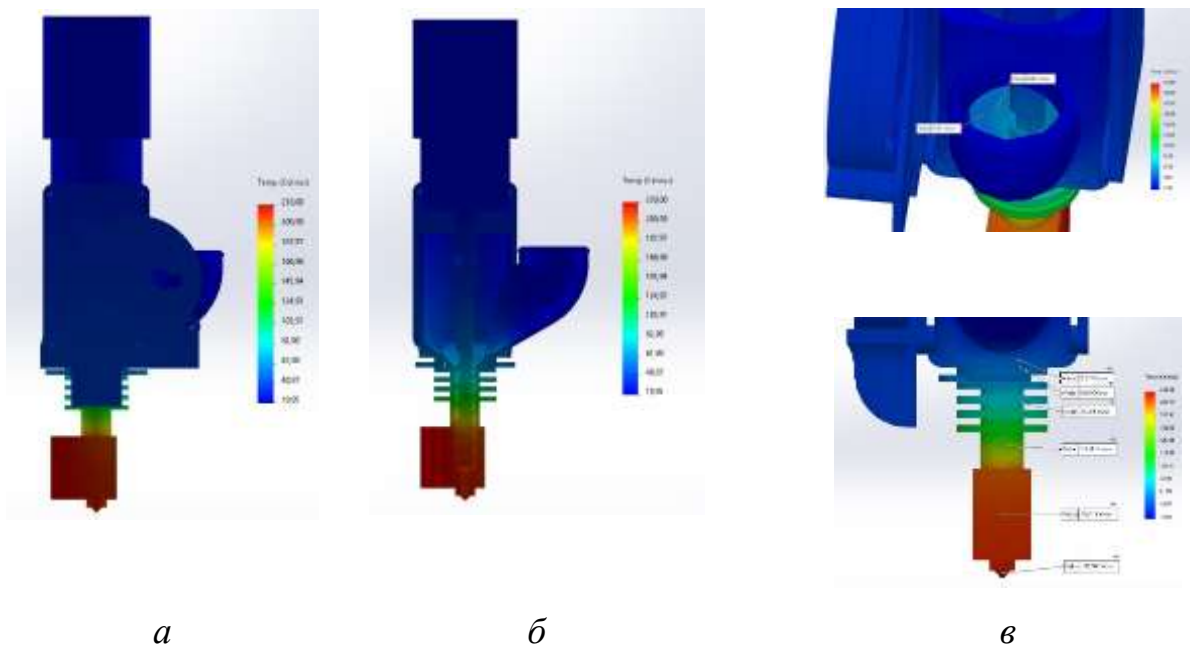


Рисунок 3.26 – Зміна температури в шнековому екструдері при повітряному охолодженні за допомогою вентилятора: *а* – суцільний; *б* – в розрізі; *в* – значення температури в точках вимірювання

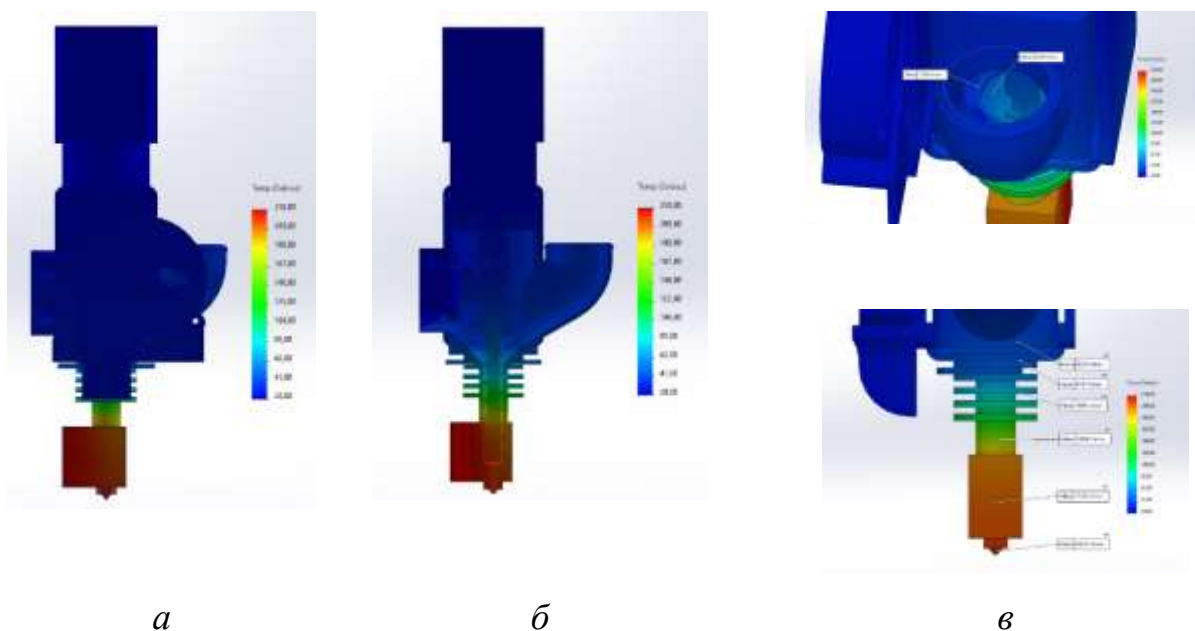


Рисунок 3.27 – Зміна температури в шнековому екструдері при повітряному охолодженні за допомогою двох вентиляторів та теплового бар'єру у вигляді прокладки з силікону: *a* – суцільний; *б* – в розрізі; *в* – значення температури в точках вимірювання

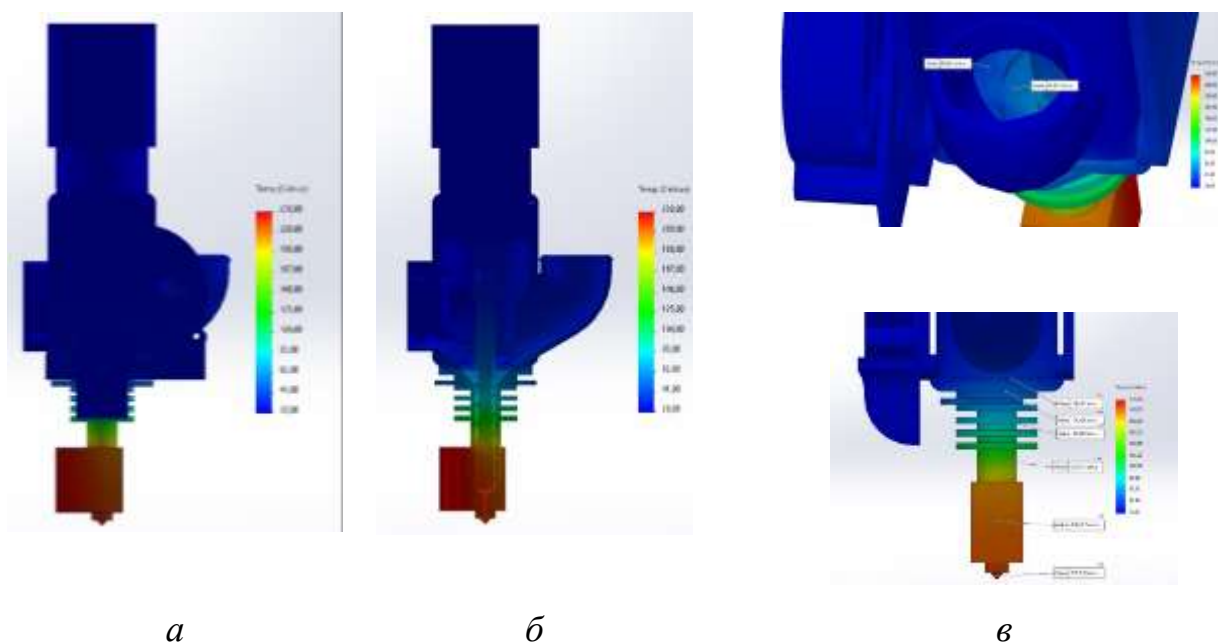


Рисунок 3.28 – Зміна температури в шнековому екструдері при повітряному охолодженні за допомогою двох вентиляторів та теплового бар'єру у вигляді прокладки з фторопласту 4: *a* – суцільний; *б* – в розрізі; *в* – значення температури в точках вимірювання

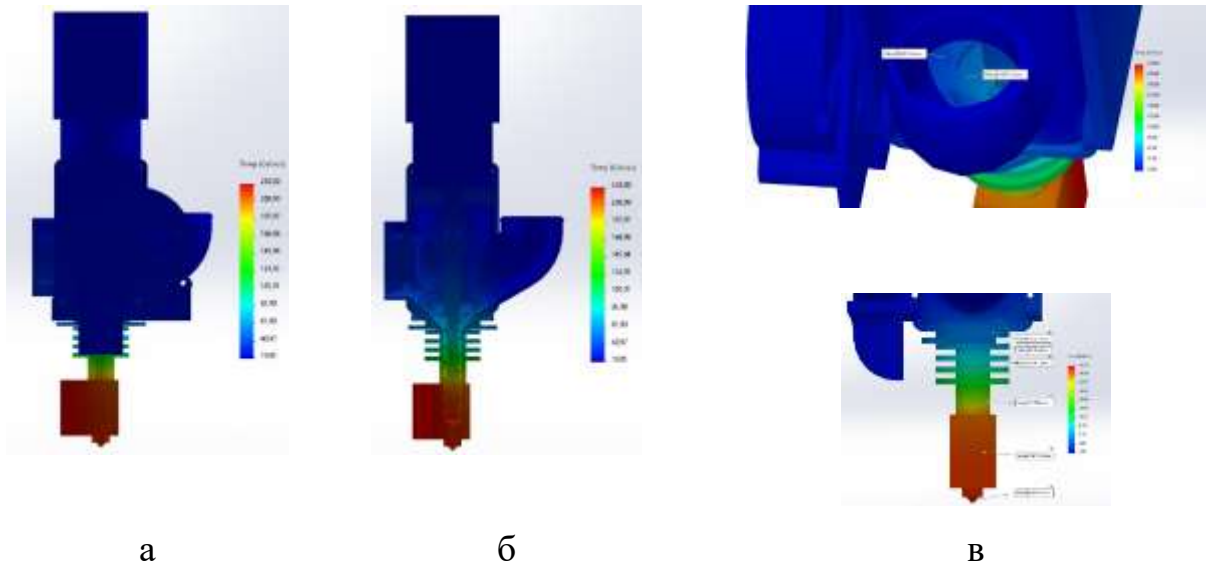


Рисунок 3.29 – Зміна температури в шнековому екструдері при повітряному охолодженні за допомогою двох вентиляторів та теплового бар'єру у вигляді прокладки з флубону 15: *а* – суцільний; *б* – в розрізі; *в* – значення температури в точках вимірювання



Рисунок 3.30 – Нагрівальний блок з тепловою ізоляцією

Каптоновий скотч є матеріалом з високою термічною стійкістю, який широко використовується в 3D-принтерах в якості покриття для робочого столу та ізоляції нагрівального блоку та проводів нагрівального елемента хотенда.

Були проведені експерименти по визначенню температури шнекового екструдера. З цією метою було розміщено 5 датчиків температури в різних його точках, зокрема: на нагрівальному елементі; на охолоджуючому радіаторі; під прокладкою теплового бар'єру; всередині завантажувального бункера; на зовнішній стороні корпусу бункера вище термопрокладки. В якості датчиків було вибрано терморезистори NTC 3950 з опором 100 кОм. Шнековий екструдер

зі встановленими датчиками температури представлено на рисунку 3.31.

Використовуючи мікроконтролер Arduino UNO R3, було зібрано вимірювальну систему для визначення температури шнекового екструдера. Ця система представлена на рисунку 3.32.



Рисунок 3.31 – Шнековий екструдер з під'єднаними терморезисторами

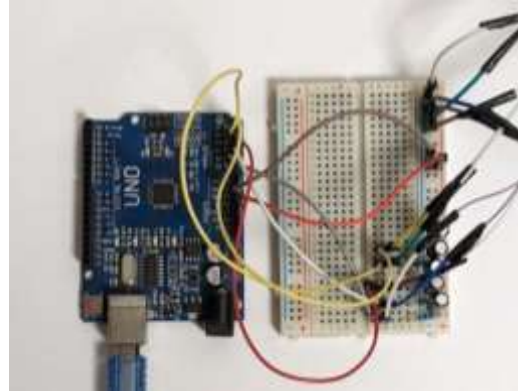


Рисунок 3.32 – Вимірювальна система для визначення температури з п'ятьма вимірювальними датчиками

Пристрій підключається до комп'ютера через USB, що дозволяє передавати дані для подальшого аналізу. Arduino Uno зчитує сигнали від датчиків температури та перетворює їх з аналогових в цифрові. Дані з Arduino передаються в комп'ютер через USB-порт і зберігаються у файлі для подальшого аналізу. Далі, використовуючи програмне середовище Microsoft Excel та отриманий файл, для візуалізації будуються графіки залежності температури від часу.

Реалізований підхід демонструє використання відкритих технологій та програмного забезпечення для створення корисних інструментів моніторингу в різних додатках, включаючи контроль температури у шнековому екструдері та при 3D-друку.

Графіки зміни температури від часу в різних місцях шнекового екструдера без обдуву охолоджуючих ребер, але з обдувом полімеру в завантажувальному бункері та наявністю термобар'єру з фторопласту і флубону наведено на рисунку 3.33–3.34.



Рисунок 3.33 – Графіки зміни температури від часу в різних місцях шнекового екструдера без обдуву охолоджуючих ребер, але з обдувом полімеру в завантажувальному бункері та наявністю термобар'єру (фторопластової прокладки)

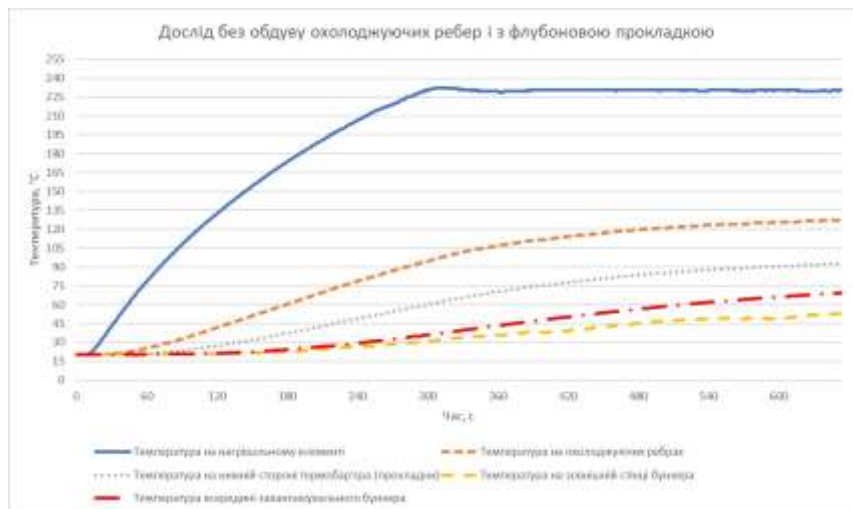


Рисунок 3.34 – Графіки зміни температури від часу в різних місцях шнекового екструдера без обдуву охолоджуючих ребер, але з обдувом полімеру в завантажувальному бункері та наявністю термобар'єру (флуобової прокладки)

Графіки зміни температури від часу в різних місцях шнекового екструдера з обдувом охолоджуючих ребер та полімеру в завантажувальному бункера і наявністю термобар'єрів з фторопласту та флубону наведено на рисунках 3.35–3.36.

Візуальне зображення нагрівання, охолодження та екструзії було знято за



допомогою тепловізійної камери Walcom HT-03. Знімки розподілу температури в різних місцях шнекового екструдера без обдуву охолоджуючих ребер, але з обдувом полімеру в завантажувальному бункері та наявністю термобар'єру (фторопластової та флуоронової прокладок), зроблені за допомогою тепловізора наведено на рисунку 3.37 та 3.38.



Рисунок 3.35 – Графіки зміни температури від часу в різних місцях шнекового екструдера з обдувом охолоджуючих ребер та обдувом полімеру в завантажувальному бункері і наявністю термобар'єру (фторопластової прокладки)



Рисунок 3.36 – Графіки зміни температури від часу в різних місцях шнекового екструдера з обдувом охолоджуючих ребер та обдувом полімеру в завантажувальному бункері і наявністю термобар'єру (флуоронової прокладки)

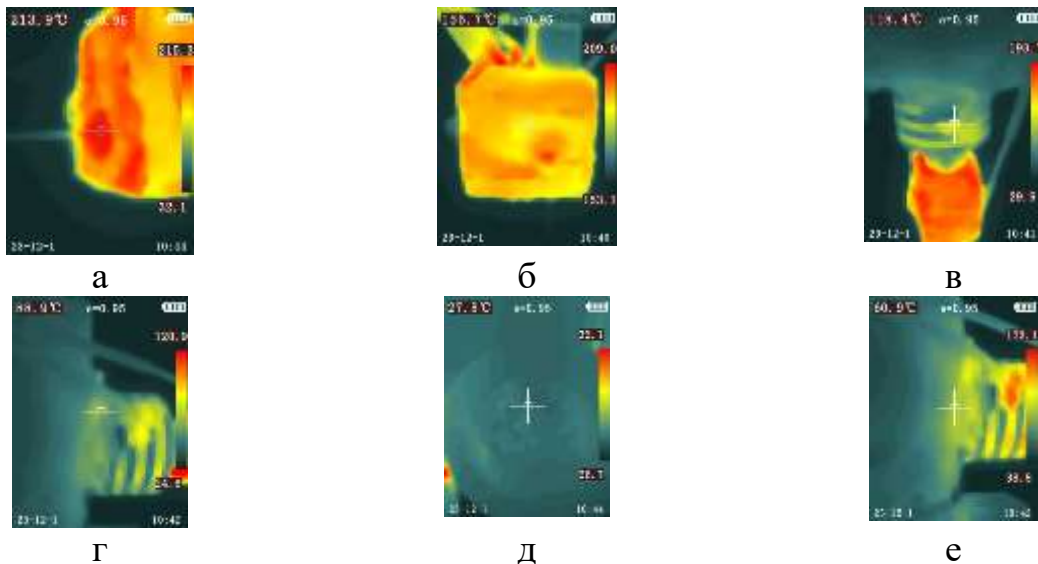


Рисунок 3.37 – Знімки розподілу температури в різних місцях шнекового екструдера без обдуву охолоджуючих ребер, але з обдувом полімеру в завантажувальному бункері та наявністю термобар'єру з фторопластової прокладки: *а* – на соплі (точка 1); *б* – на нагрівальному елементі (точка 2); *в* – на охолоджуючих ребрах (точка 3); *г* – на нижній стороні фторопластової прокладки (точка 4); *д* – всередині завантажувального бункера (точка 5); *е* – на зовнішній стінці бункера вище термопрокладки (точка 6)

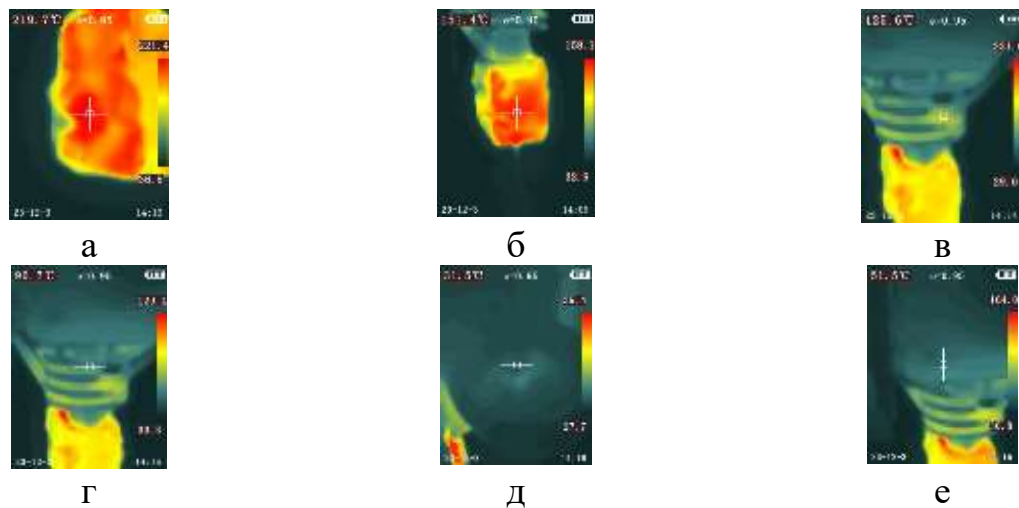


Рисунок 3.38 – Знімки розподілу температури в різних місцях шнекового екструдера без обдуву охолоджуючих ребер, але з обдувом полімеру в завантажувальному бункері та наявністю термобар'єру з флуоронової прокладки: *а* – на соплі (точка 1); *б* – на нагрівальному елементі (точка 2); *в* – на охолоджуючих ребрах (точка 3); *г* – на нижній стороні флуоронової прокладки (точка 4); *д* – всередині завантажувального бункера (точка 5); *е* – на зовнішній стінці бункера вище термопрокладки (точка 6)

Знімки розподілу температури в різних місцях шнекового екструдера з обдувом охолоджуючих ребер та полімеру в завантажувальному бункера і наявністю термобар'єру (фторопластової та флуоронової прокладок), зроблені за допомогою тепловізора наведено на рисунку 3.39 та 3.40.

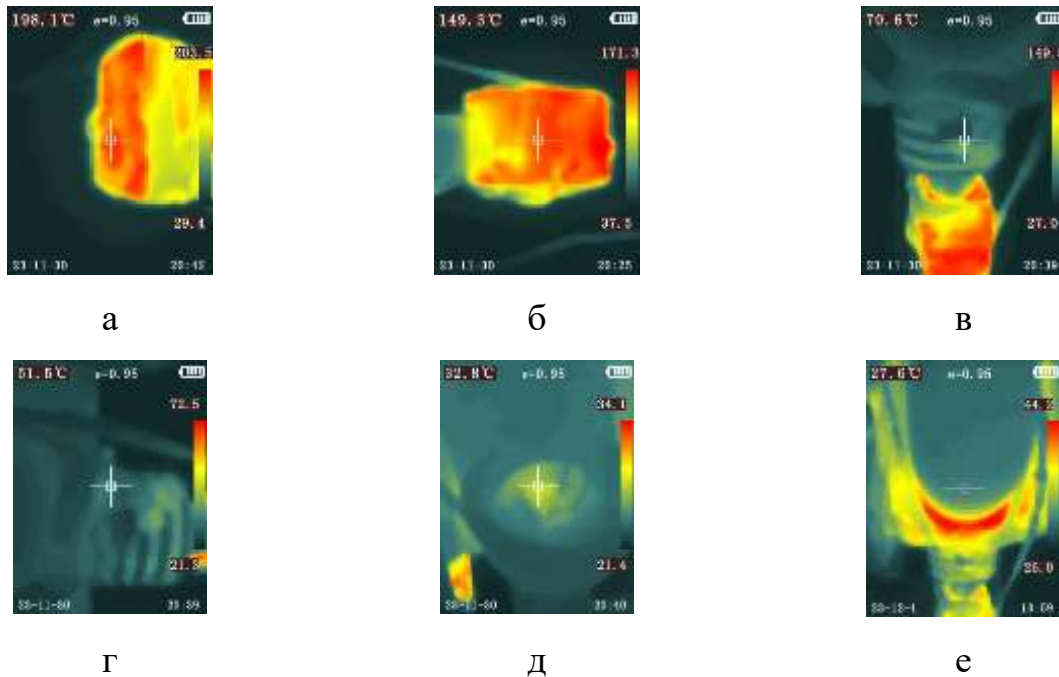


Рисунок 3.39 – Знімки розподілу температури в різних місцях шнекового екструдера з обдувом охолоджуючих ребер та полімеру в завантажувальному бункері і наявністю термобар'єру з фторопластової прокладки: *a* – на соплі (точка 1); *б* – на нагрівальному елементі (точка 2); *в* – на охолоджуючих ребрах (точка 3); *г* – на нижній стороні фторопластової прокладки (точка 4); *д* – всередині завантажувального бункера (точка 5); *е* – на зовнішній стінці бункера вище термопрокладки (точка 6)

Значення температур в місцях вимірювання при моделюванні в програмному середовищі SolidWorks Simulation та при двох способах вимірювання без обдуву охолоджуючих ребер, але з обдувом полімеру в завантажувальному бункері та наявністю термобар'єру (фторопластової та флуоронової прокладок) наведено в табл.Л.1 і Л.2 (додаток Л).

Значення температур в місцях вимірювання при моделюванні в програмному середовищі SolidWorks Simulation та при двох способах

вимірювання з обдувом охолоджуючих ребер і полімеру в завантажувальному бункері та наявністю термобар'єру (фторопластової та флубонової прокладок) наведено в табл.Л.3 і Л.4 (додаток Л).

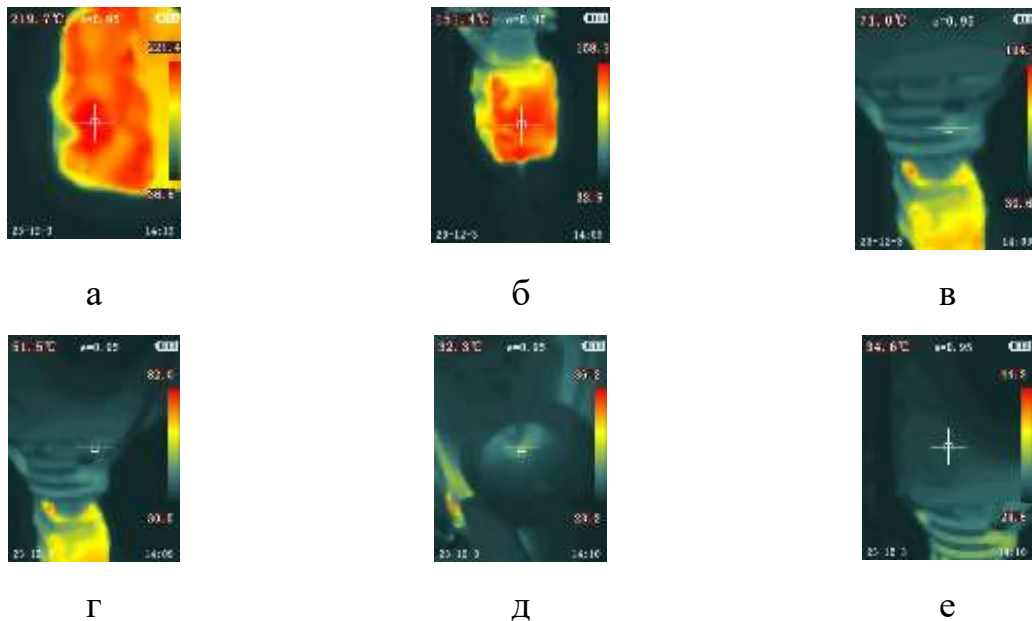


Рисунок 3.40 – Знімки розподілу температури в різних місцях шнекового екструдера з обдувом охолоджуючих ребер та полімеру в завантажувальному бункері і наявністю термобар'єру з флубонової прокладки: *а* – на соплі (точка 1); *б* – на нагрівальному елементі (точка 2); *в* – на охолоджуючих ребрах (точка 3); *г* – на нижній стороні флубонової прокладки (точка 4); *д* – всередині завантажувального бункера (точка 5); *е* – на зовнішній стінці бункера вище термопрокладки (точка 6)

Похибка між теоретичними (рис.3.25-3.29) та експериментальними (рис.3.33-3.40) значеннями температур в різних місцях шнекового екструдера при використанні розробленої системи охолодження визначалася за формулою:

$$\varepsilon = \frac{\pm(x_{\text{вим.}} - x_{\text{д}})}{x_{\text{д}}} \cdot 100\% = \frac{\pm\Delta_x}{x_{\text{д}}} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

де  $x_{\text{д}}$  – дійсне значення вимірюваної величини;  $x_{\text{вим.}}$  – виміряне значення величини;  $\Delta_x$  – відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини.

За дійсне значення вимірної величини приймалися покази розробленої системи вимірювання на базі терморезисторів NTC 3950, які пройшли повірку та мають похибку вимірювання в межах  $\pm 1$  °C.

Найбільша похибка при розрахунку за формулою (3.2) теоретичних та експериментальних значень температур у різних місцях шнекового екструдера (табл.Л.1 і Л.2, додаток Л) без обдуву повітрям охолоджуючих ребер склала 27,5%. Таку велику похибку можна пояснити тим, що датчик температури не щільно прилягав до внутрішньої стінки завантажувального бункера. Це відобразилося на показах вимірювального приладу.

Найбільша похибка при розрахунку за формулою (3.2) теоретичних та експериментальних значень температур у різних місцях шнекового екструдера (табл.Л.3 і Л.4, додаток Л) із використанням розробленої системи охолодження становила 9,6%, що знаходиться в межах допустимого. Це свідчить про високу точність та надійність вимірювань, що є критично важливим для забезпечення контролю якості процесу 3D-друку. Така висока точність дозволяє оптимізувати параметри нагрівання, забезпечуючи оптимальні умови для плавлення полімеру, та мінімізувати ризик дефектів в друкованих виробках. Результати також підкреслюють ефективність використання поєднання різних типів вимірювальних інструментів для отримання точних даних, які можуть бути використані для подальшого вдосконалення конструкції та процесів роботи екструдера.

### 3.4. Перевірка працездатності обладнання тривимірного друку з шнековим екструдером та налаштування оптимальних режимів роботи

Надалі було проведено налаштування оптимальних параметрів 3D-принтера із встановленим шнековим екструдером та друк тестового кубика подрібненими частками пластику TPU (рис.3.41, а). Його друк відбувався з дефектами. Дефекти друку тестового кубика із пластику TPU наведено на рисунку 3.42.



а



б

Рисунок 3.41 – Матеріал для 3D-друку: *а* – подрібнені частки пластику TPU;  
*б* – мононитка з пластику TPU



Рисунок 3.42 – Дефекти 3D-друку тестового кубика

Аналіз цих дефектів допоміг ідентифікувати кілька ключових проблем, які потребували уваги під час подальшої оптимізації процесу друку. Спостерігались варіації в товщині шарів надрукованого зразка, що могло свідчити про нестабільність подачі полімерного матеріалу або недостатньо точне налаштування висоти шару. Частини кубика мали слабе зчеплення між шарами. Це вказувало на потенційні проблеми з температурним режимом під час тривимірного друку. Деякі зони кубика мали нерівномірне або неповне заповнення. Це могло бути пов'язано з неправильними налаштуваннями швидкості друку або переміщення екструдера.

На основі цих спостережень та дефектів були скореговані параметри друку. У результаті цього було надруковано тестовий кубик із параметрами, що задовольняли (рис.3.43, а). Паралельно було надруковано тестовий кубик з пластику TPU (рис.3.41, б) на 3D-принтері Anycubic Mega S з філаментним екструдером (рис.3.43, б).

Отриманий зразок тестового кубика, надрукованого подрібненими частками пластику TPU, підтвердив працездатність розробленого шнекового екструдера.



а



б

Рисунок 3.43 – Надрукований тестовий кубик: *а* – подрібнені частки пластику TPU; *б* – мононитка пластику TPU

Порівняння кубиків з TPU (рис.3.43) показало хорошу точність розмірів. Виявлено, що кубик, надрукований шнековим екструдером, має краще зчеплення між шарами, що свідчить про більш ефективне плавлення та злиття полімеру під час друку.

Для порівняння також було надруковано деталь «шестерня» із зазначених вище матеріалів (рис.3.44) Друк шестерні на 3D-принтері зі шнековим екструдером подрібненими частками полімеру ще раз підтвердив працездатність обладнання та можливість виготовлення деталей і виробів для потреб легкої промисловості та галузевого машинобудування.



а



б



в

Рисунок 3.44 – Деталь «шестерня»: *а* – пластик TPU (філаментний екструдер); *б* – TPU (шнековий екструдер); *в*– вид деталей в торець

### 3.5. Висновки до третього розділу

1. Проведені експериментальні дослідження на розробленому та виготовленому прототипі 3D-принтера з шнековим екструдером, вказали на потребу у шнеках із заданою геометрією. Ця геометрія залежить від коефіцієнта

стиснення матеріалу в зоні стиснення шнекового екструдера. Оптимальна форма шнека дозволить уникнути дефектів під час друку та забезпечить якість готових надрукованих виробів. Також виявлені критичні моменти, які впливають на продуктивність, рівномірність подачі розплавленого полімеру та працездатність пристрою. Їх усунення знизить навантаження на систему переміщення та попередить швидкий знос деталей.

2. Розробка експериментального зразка шнекового екструдера для обладнання тривимірного друку в програмному середовищі SolidWorks дозволила не тільки точно змоделювати основні компоненти (шнек, матеріальний циліндр, сопло, бункер тощо), але й виявити та усунути недоліки, що були виявлені при аналізі прототипу. Виконані дослідження шнекового екструдера з використанням SolidWorks дозволили оптимізувати його конструкцію, що сприятиме підвищенню продуктивності та якості друку при виготовленні деталей і виробів легкої промисловості.

3. Здійснені розрахунки шнеку на міцність з використанням програми SolidWorks Simulation дозволили виявити потенційні слабкі місця конструкції шнека і внести потрібні корективи для забезпечення надійності і довговічності роботи цього робочого органу та розрахувати коефіцієнт запасу міцності. Для розробленого шнеку цей коефіцієнт знаходиться в допустимих межах.

4. Отримана технічна документація та креслення дозволили виготовити спроектовані деталі шнекового екструдера та зробити підбір стандартних деталей, вибрати елементи приводу, нагрівального блоку та системи охолодження. Заміна друкуючої головки, що друкує філаментом на шнековий екструдер в 3D-принтері Anycubic Mega S дала змогу адаптувати пристрій для роботи з гранулами та подрібненими полімерними відходами. Також було синхронізовано роботу екструдера з обладнанням тривимірного друку, здійснено налаштування програмного забезпечення.

5. Здійснені теоретичні, з використанням програмного середовища SolidWorks Simulation, та експериментальні дослідження системи охолодження шнекового екструдера підтвердили її ефективність. Результати



продемонстрували, що застосування охолоджуючих ребер на матеріальному циліндрі, їх обдув потоком повітря від встановленого вентилятора, розміщення термобар'єру між завантажувальним бункером та матеріальним циліндром у вигляді прокладки, охолодження зони подачі полімеру в канал шнеку в завантажувальному бункері за рахунок потоку повітря від другого вентилятора, забезпечує значне зниження температури в критичних місцях. Проведені експериментальні дослідження виявили, що флубон 15 є найефективнішим композиційним матеріалом для створення теплового бар'єру між матеріальним циліндром і бункером.

6. Проведені експериментальні дослідження з визначення температури шнекового екструдера в різних точках розміщення термодатчиків із застосуванням розробленої системи вимірювання підтвердили точність та надійність системи моніторингу температур. Використання цієї системи дозволило отримати точні дані про температуру в різних точках екструдера.

7. Застосування двох методів вимірювання температури: за допомогою розробленої системи з використанням терморезисторів, а також із застосуванням тепловізійної камери підтвердили результати температурного моделювання в шнековому екструдері з використанням SolidWorks Simulation. Похибка між теоретичними та експериментальними значеннями склала 9,6%, що є допустимим в таких дослідженнях.

8. Проведена перевірка працездатності розробленого шнекового екструдера обладнання тривимірного друку дала позитивні результати. Перші спроби друку тестового кубика подрібненими відходами пластику TPU виявили необхідність оптимізації налаштувань обладнання через виявлені дефекти, такі як: нерівномірність надрукованих шарів і слабке зчеплення між ними. Після корекції параметрів, якість друку значно покращилася, що продемонстрували надруковані тестові кубики і деталі типу «шестерня». Отриманий результат підтверджує здатність шнекового екструдера обладнання тривимірного друку ефективно виготовляти готову продукцію, зокрема деталі і вироби легкої промисловості.

## РОЗДІЛ 4.

## АНАЛІЗ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОДРІБНЕНИХ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА ОБЛАДНАННЯ ТРИВИМІРНОГО ДРУКУ

4.1. Експериментальне дослідження подрібнених полімерних відходів, що використовуються в якості вихідної сировини для шнекового екструдера обладнання тривимірного друку

Для подрібнення полімерних відходів (рис.1.2, 1.14, 1.15) легкої промисловості та тих, що виникають в процесі 3D-друку, було використано подрібнювач від компанії Ero3d [99, 100].

Основні технічні параметри міні шредера для подрібнення: максимальна частота обертання валу  $n_{подр.} = 15$  об/хв; потужність електродвигуна 180 Вт; діаметр отворів фільтруючої сітки 6 мм. Інші характеристики описані в роботі [100].

Загальний вигляд міні шредера з його основними елементами наведено на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 – Міні шредер для подрібнення полімерних відходів:

- 1 – завантажувальний бункер; 2 – контейнер для подрібнених часток полімеру;  
3 – регулятор частоти обертання подрібнюючого органу; 4 – полімерний матеріал, що подрібнюється; 5 – подрібнені частки полімеру

Шредер з одним валом для подрібнення полімерних відходів працює наступним чином (рис.4.2). Полімерні відходи завантажуються в бункер 1 шредера (рис.4.3). Вони можуть бути у вигляді шматків, стрічок, гранул або інших форм, що потребують подрібнення. Всередині шредера знаходиться робочий вал з розміщеними на ньому ножами. Цей вал обертається, забезпечуючи різання, стирання або роздавлювання матеріалу. Під час обертання вала різальні елементи взаємодіють з матеріалом та плитою з пазами, яка розміщена на корпусі пристрою. Коли ножі заходять в пази плити, то відбувається розрізання матеріалу на менші частини. В нижній частині шредера розміщена сітка з отворами певного діаметру, які дозволяють регулювати максимальний розмір часток. Частки меншого діаметра просіваються через решітку, а більшого знову захоплюються ножами і подаються в зону різання. Подрібнені частки, які просіваються через сітку, накопичуються в спеціальному контейнері для подальшої переробки або використання (рис.4.4).



Рисунок 4.2 – Завантажувальний бункер з полімерними відходами



Рисунок 4.3 – Контейнер з подрібненими полімерними частками

Для виконання операції подрібнення було відібрано відходи трьох видів: ABS, PLA та TPU пластику, що утворилися в процесі 3D-друку. В подальшому вони піддавалися операції механічного руйнування за допомогою вибраного устаткування та просіюванню за допомогою ситового аналізу.

Процес виконання операції подрібнення ABS пластику ножами шредера показано на рисунку 4.4.



а



б

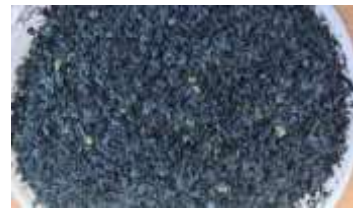
Рисунок 4.4 – Подрібнення пластику ABS ножами шредера: *а* – куски матеріалу в бункері; *б* – захоплення кусків матеріалу ножами

У зв'язку з тим, що діаметр отворів в сітці шредера складає 6 мм, для отримання необхідних фракцій подрібненого полімеру 2,5 мм і менше, було встановлено у шредері додаткову сітку з діаметром отворів 3 мм. Куски полімерного матеріалу, що подрібнювалися ножами, просівалися через неї.

Загальний вигляд подрібнених часток ABS пластику показано на рисунку 4.5.



а



б

Рисунок 4.5 – Подрібнені частки ABS пластику, що утворилися з відходів 3D-друку: *а* – частки після першого подрібнення; *б* – частки після другого подрібнення

Під час виконання операції подрібнення Mini Shredder забезпечив високошвидкісні та високоякісні результати за низького енергоспоживання.

Для проведення експериментальних досліджень із ситового аналізу та насипної густини подрібнених часток, визначення густини надрукованої з полімерних відходів на 3D-принтері з шнековим екструдером мононитки, використовувалося наступне обладнання: мірні ємності різного об'єму; ваги лабораторні; штангенциркуль; вібраційна установка 028-М; комплект сит.

У подальшому подрібнені матеріали піддавалися ситовому аналізу. У процесі ситового аналізу використовували 6 металопробивних сит з діаметром оболонки 200 мм та висотою стінки 50 мм, виготовлених з оцинкованої сталі. Діаметри отворів на ситах склали: 1,0 мм; 1,2 мм; 1,5 мм; 1,8 мм; 2,0 мм; 2,4 мм. Розмір часток фракції матеріалу визначався за розміром отворів сит, розташованих одне над іншим. Наприклад, якщо розмір отвору нижнього сита становить 1,0 мм, а верхнього - 1,2 мм, то частки, що залишаються між цими ситами після просіювання, будуть мати розмір у діапазоні від 1,0 до 1,2 мм.

За допомогою набору сит подрібнені частки матеріалу розділяються на фракції за розміром зерен. Проба матеріалу, що аналізується, поміщається на сито з найбільшими розмірами отворів в наборі, що використовується. Подрібнені частки, що проходять через сито, падають на наступне, більш тонке, і так до останнього з найменшим діаметром отворів. При просіюванні сита встановлюються одне на одне (рис.4.6). Набір сит з подрібненими частками розміщується на лабораторній вібраційній машині 028-М. Через заданий проміжок часу проба матеріалу розділяється на фракції.

Кількість подрібненого матеріалу, що залишається на ситах після процесу просіювання, кількісно оцінювалася, а потім визначалася його частка у відсотках від загальної маси, взятої на аналіз проби (рис.4.7).



Рисунок 4.6 – Металопробивні сита



Рисунок 4.7 – Визначення маси фракції матеріалу на ситі

Фото розподілених по фракціях на ситах після виконання операції просіювання подрібнених часток показано на рисунку 4.8, а після кількісного оцінювання – на рисунку 4.9.



Рисунок 4.8 – Розподілені по фракціях подрібнені частки після просіювання



Рис.4.9 – Розподілені по фракціях подрібнені частки після зважування

Результати ситового аналізу зазвичай візуалізуються за допомогою графіка диференціальної кривої розподілу. Ця крива відображає відсоткову частку кожної фракції в загальній масі матеріалу. На графіку кожна точка відповідає фракції з певним середнім розміром зерен, яка визначається як середнє арифметичне між розмірами отворів двох сусідніх сит. Тому фракція, яка пройшла через одне сито і затрималася на наступному, відображається на графіку як точка, що відповідає цьому середньому розміру.

Масова доля подрібнених часток у фракції визначається із співвідношення:

$$M_{ф.} = \frac{M_i}{M_{заг.}} \cdot 100 \%, \quad (4.1)$$

де  $M_i$  – маса часток на ситі;  $M_{заг.}$  – загальна маса всіх фракцій, що рівняється початковій масі завантаженого на сито з найбільшими отворами подрібненого полімеру.

Визначивши середні розміри зерен між розмірами отворів двох сусідніх сит (рис.4.6) та за формулою (4.1) масову долю кожної фракції, використовуючи програмне середовище Microsoft Excel, було отримано криві розподілу подрібнених часток, що піддавалися механічній дії робочих органів шредера. Графіки розподілу подрібнених часток ABS, PLA і TPU пластиків з визначеними поліноміальними регресійними залежностями наведено на рисунках 4.10-4.12.

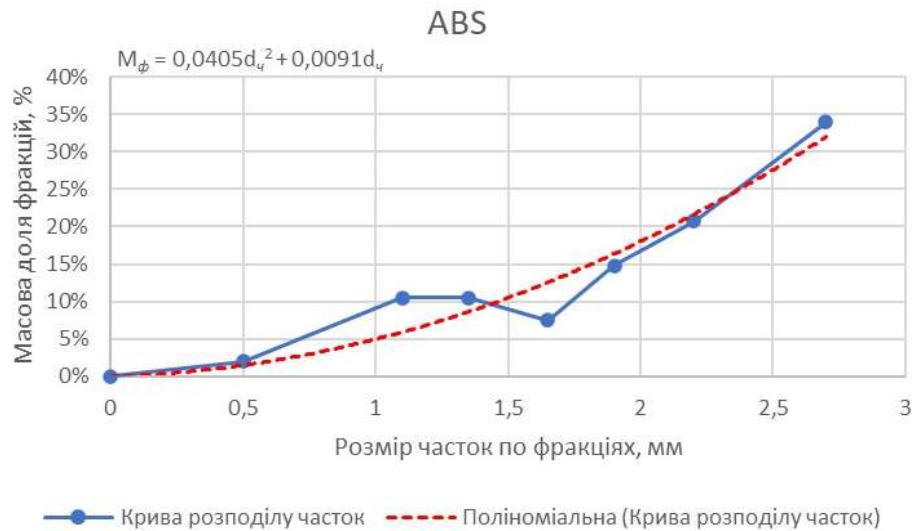


Рисунок 4.10 – Крива розподілу подрібнених часток ABS пластику

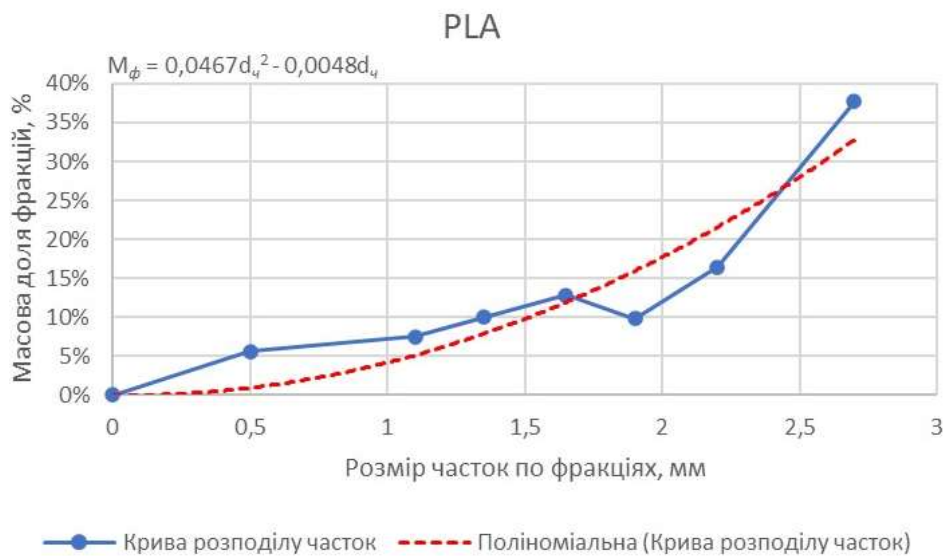


Рисунок 4.11 – Крива розподілу подрібнених часток PLA пластику

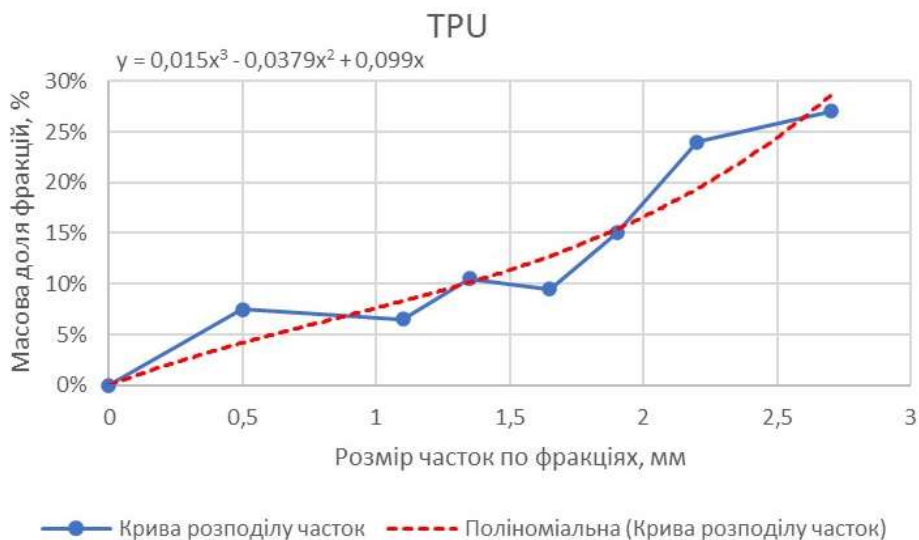


Рисунок 4.12 – Крива розподілу подрібнених часток TPU пластику

Далі було проведено визначення насипної густини пластиків, що піддавалися подрібненню. Метою експериментального дослідження було отримання залежностей насипної густини від фракційного складу матеріалу, що подрібнювався.

Насипна густина сипучого матеріалу визначається як маса цього матеріалу на одиницю об'єму, який він займає. Цей параметр є ключовим при визначенні необхідного об'єму бункерів дробарок, змішувачів та при розрахунку енерговитрат на переробку сипучих матеріалів. Значення насипної густини залежить від багатьох факторів, включно з розміром і густиною часток, вмістом вологи та їх взаємним розміщенням у шарі.

Важливо зазначити, що насипна густина може змінюватися навіть при зберіганні матеріалу в спокої; вона може збільшуватися під впливом вібрацій ємності або зменшуватися при перемішуванні, наближаючись до певного граничного значення. Для деяких матеріалів коефіцієнт насипної густини може досягати 1,52 [125].

За гранулометричним складом сипучого матеріалу оцінюють кількісний розподіл часток, що входять до його складу, вимірюючи лінійні розміри. Більшість сипучих матеріалів мають частки неправильної форми. Для них умовний діаметр  $d_i$ , розраховується як середнє арифметичне або середнє геометричне трьох вимірювань лінійних розмірів частки (довжина, висота і ширина).

Сипучий матеріал лише в деяких випадках складається з частинок однакового розміру. Частіше в ньому значення  $d_i$  змінюється дискретно від деякого мінімального розміру  $d_{min}$  до максимального  $d_{max}$ . Відношення  $d_{min}/d_{max}$  у деяких сипучих матеріалах може бути дуже великим. Про розподіл часток полідисперсних матеріалів за розміром можна дізнатися за допомогою ряду розподілу дискретної випадкової величини  $d_i$ , в якому перераховані значення цієї випадкової величини:  $d_1; d_2; d_n$  з відповідною ймовірністю  $p_1, p_2, \dots, p_n$  або частотами  $n_1, n_2, \dots, n_n$ . Визначення цілого ряду дискретних випадкових значень  $d_i$  для полідисперсних матеріалів з великим відношенням  $d_{min}/d_{max}$  є складною



задачею, тому цей ряд замінюють дискретним рядом класів (часток) значень  $d_i$ . Для визначення гранулометричного складу сипучих матеріалів у цих дослідженнях використано методи прямого вимірювання та ситового аналізу [125].

Суміш різних фракцій готувалася у певному співвідношенні. За допомогою мірної ємності та ваг визначалася насипна густина кожної фракції подрібненого полімеру та суміші.

У якості матеріалу для дослідження застосовувалися подрібнені відходи полімерних матеріалів, що використовувалися при ситовому аналізі.

При проведенні досліджень застосовувався метод симплексно-решіткового планування експерименту [125]. Суміші подрібненого ABS-пластику формували трьома просіяними фракціями (табл.4.1), масова частка яких змінювалася на чотирьох рівнях: 0; 0,33; 0,66, 1.

Таблиця 4.1

Гранулометричний склад фракцій досліджуваних матеріалів

Розмір часток пластику ABS, мм	1,2	1,8	2,5
Визначення кількісного вмісту	X1	X2	X3

Насипну густину сипучого матеріалу, що досліджувався розраховували за формулою:

$$\rho_{н.з.} = \frac{m_{\epsilon.м.} - m_{\epsilon.}}{V_{м.с.}} \quad (4.2)$$

де  $m_{\epsilon.м.}$  – маса ємності з матеріалом;  $m_{\epsilon.}$  – маса ємності без матеріалу;  $V_{м.с.}$  – об'єм ємності.

Експерименти повторювали три рази.

У результаті обробки експериментальних даних встановлено, що насипна густина сумішей фракцій подрібнених матеріалів розміром від 1,2 до 2,4 мм змінюється в межах 15 % (рис.4.13-4.15), тому отримані експериментальні дані апроксимовано залежно від середнього розміру часток у суміші матеріалів за

формулою:

$$d_{ч.с.} = d_1 \cdot X_1 + d_2 \cdot X_2 + d_3 \cdot X_3, \quad (4.3)$$

де  $d_1, d_2, d_3$  – розмір часток у фракціях суміші;

$X_1, X_2, X_3$  – кількісний вміст фракцій у суміші.

Результати експерименту по визначенню насипної густини подрібнених часток ABS пластику наведені в таблиці М.1 (додаток М).

Результати обробки даних експериментальних досліджень подрібнених часток ABS пластику від середнього розміру часток сусідніх фракцій наведено на рисунку 4.13.

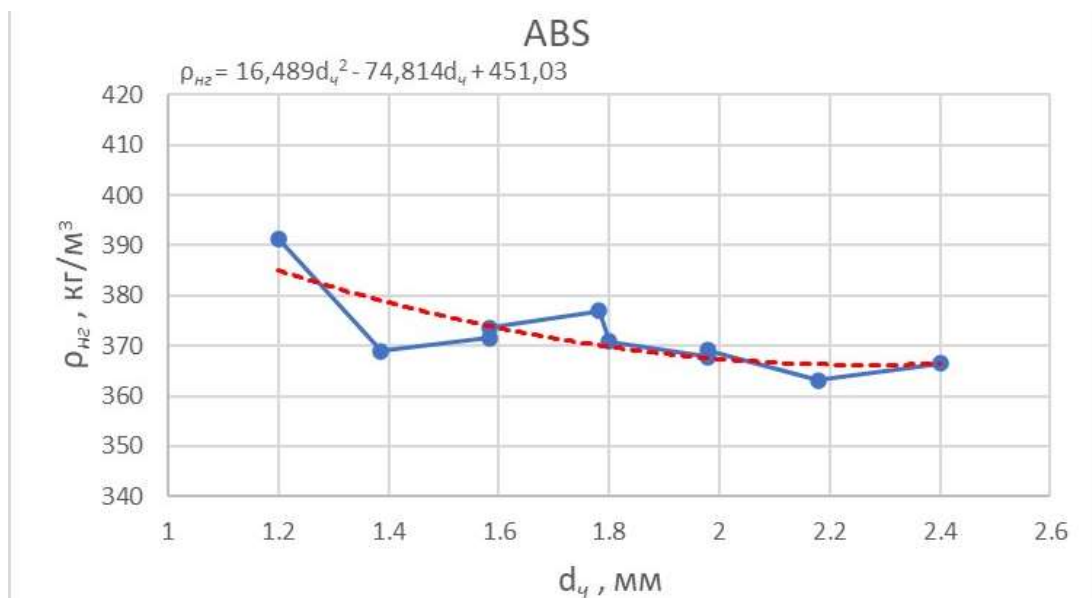


Рисунок 4.13 – Результати обробки даних експериментальних досліджень подрібнених часток ABS пластику від середнього розміру часток сусідніх фракцій

Результати експерименту по визначенню насипної густини подрібнених часток PLA пластику наведені в таблиці М.2 (додаток М).

Результати обробки даних експериментальних досліджень подрібнених часток PLA пластику від середнього розміру часток сусідніх фракцій наведено на рисунку 4.14.

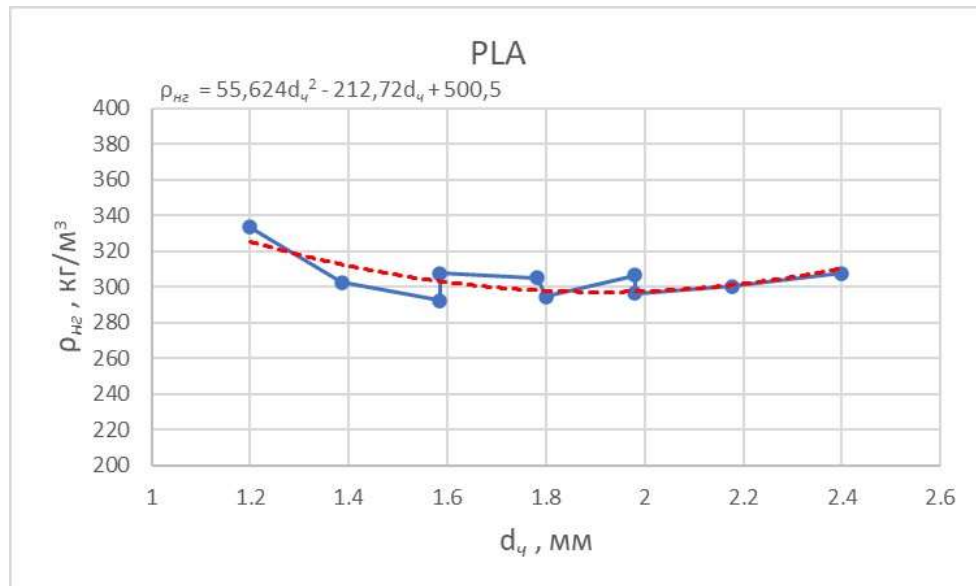


Рисунок 4.14 – Результати обробки даних експериментальних досліджень подрібнених часток PLA пластику від середнього розміру часток сусідніх фракцій

Результати експерименту по визначенню насипної густини подрібнених часток TPU пластику наведені в таблиці М.3 (додаток М).

Результати обробки даних експериментальних досліджень подрібнених часток TPU пластику від середнього розміру часток сусідніх фракцій наведено на рисунку 4.15.

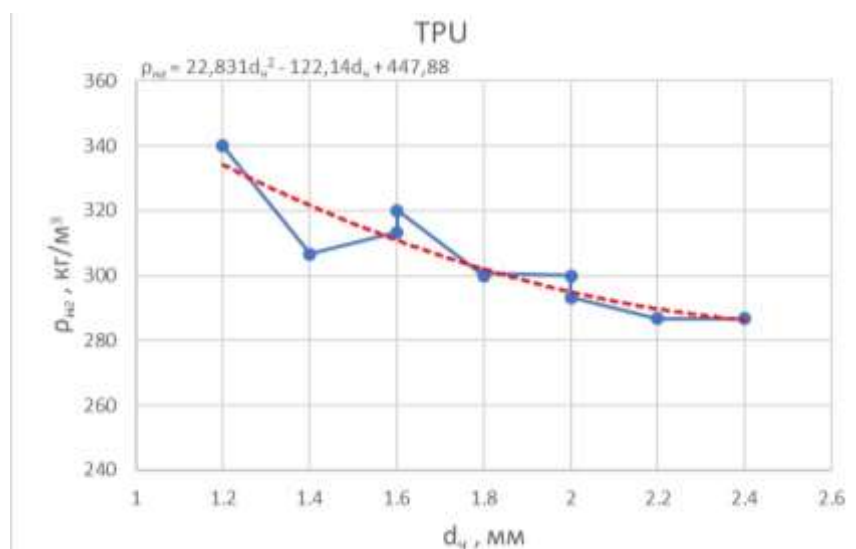


Рисунок 4.15 – Результати обробки даних експериментальних досліджень подрібнених часток TPU пластику від середнього розміру часток сусідніх фракцій

Для визначення густини сформованої мононитки з подрібнених часток полімерних матеріалів, використовувався 3D-принтер з шнековим екструдером (рис.3.18, а). За допомогою нього друкувалася полімерна нитка. Після її остигання брався зразок довжиною 50 см. За допомогою штангенциркуля визначався його діаметр, а за допомогою ваг – маса (рис.М1, додаток М).

Об'єм зразка визначався за формулою:

$$V_{n.з.} = \frac{\pi \cdot d_{n.з.} \cdot l_{n.з.}}{4}, \quad (4.4)$$

де  $d_{n.з.}$  – діаметр полімерного зразка;  $l_{n.з.}$  – довжина полімерного зразка.

Для розрахунку густини матеріалу використовувалася формула:

$$\rho_{n.м.} = \frac{m_{n.з.}}{V_{n.з.}}, \quad (4.5)$$

де  $m_{n.з.}$  – маса полімерного зразка;  $V_{n.з.}$  – об'єм полімерного зразка.

Провівши розрахунки за формулами (4.4, 4.5), було визначено густину полімерних матеріалів, що досліджувалися. Результати розрахунків представлені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Функції розрахунку насипної густини залежно від середнього розміру часток полімерних матеріалів: ABS, PLA та TPU пластиків

№	Матеріал	Експериментальне значення густини $\rho_{n.м.}$ , кг/м <sup>3</sup>	Довідникове значення густини $\rho_{n.м.}$ , кг/м <sup>3</sup>	Насипна густина суміші фракцій 1,2...2,4 мм, кг/м <sup>3</sup>
1	Пластик ABS	1110	1050	$\rho_{n.з.} = 22,831d_q^2 - 122,14d_q + 447,88$
2	Пластик PLA	1245	1200	$\rho_{n.з.} = 55,624d_q^2 - 212,72d_q + 500,5$
3	Пластик TPU	1230	1150	$\rho_{n.з.} = 88,542d_q^2 - 586,67d_q + 1303,2$

Похибка між табличним та експериментальним значеннями густини визначалася за формулою (3.2). За дійсне значення вимірної величини приймалася густина полімерного матеріалу, що наводиться в довідниках.

Найбільша похибка між довідниковими та експериментальним значеннями густини (табл.4.2) склала 6,95% для пластику TPU. Проведений аналіз показав, що значення густин ABS, PLA та TPU пластиків, що досліджувалися, знаходяться в межах допустимого.

Отримані функції для розрахунку насипної густини полімерних матеріалів в залежності від середнього розміру часток представлені в табл.4.2.

У роботі [125] було визначено функції розрахунку насипної густини в залежності від середнього розміру часток для наступних полімерних матеріалів: гуми, поліетилену та PVC пластику (табл.4.3). Отримані залежності можна також використовувати в розрахункових формулах при визначенні об'ємної продуктивності шнекового екструдера 3D-принтера.

Таблиця 4.3

Функції розрахунку насипної густини залежно від середнього розміру часток полімерних матеріалів: гуми; поліетилену та PVC пластику

№ п/п	Матеріал	Густина полімеру $\rho_{н.м.}$ , кг/м <sup>3</sup>	Насипна маса суміші фракцій 10,0...2,0 мм, кг/м <sup>3</sup>
1	Пластик PVC	1250	$\rho_{н.г.} = 519 - 423 \exp(0,834d_{ч.})$
2	Гума	1100	$\rho_{н.г.} = 478 - 309 \exp(0,7224d_{ч.})$
3	Поліетилен	950	$\rho_{н.г.} = 398 - 257 \exp(0,6724d_{ч.})$

#### 4.2. Експериментальне дослідження об'ємної продуктивності шнекового екструдера обладнання тривимірного друку

На сьогодні відсутні залежності, які прямо пов'язують розмір подрібнених часток полімеру, що подаються в зону завантаження, з об'ємною продуктивністю шнекового екструдера. Це пов'язано зі складністю та багатофакторністю процесу екструзії. Аспекти, які впливають на це можуть бути наступними: тип полімерного матеріалу; розмір часток, який впливає на насипну густину матеріалу, швидкість його плавлення та здатність до проходження через екструдер; технічні параметри шнекового екструдера;

комплексність процесу екструзії (одночасна подача, плавлення та дозування матеріалу); потреба в експериментальних даних.

Відсутність універсальної формули, яка б прямо пов'язувала об'ємну продуктивність пристрою з діаметром полімерних часток, частотою обертання шнека та температурою нагрівання матеріалу, вимагає індивідуального підходу при проєктуванні та налаштуванні екструдерів, з урахуванням специфіки кожного окремого виробничого процесу.

Проведено планування експерименту із застосуванням некомпозиційних планів другого порядку (вибірка з плану типу  $3^k$ ), де число факторів  $k = 3$ ,  $p = 3$ ,  $N = 15$ , число повторних дослідів  $n = 3$ .

Обрані фактори  $x_1, x_2, \dots, x_n$  представляють розмірні величини, які можуть мати різні порядки, що створює певні труднощі під час проведення розрахунків.

Для полегшення запису умов дослідів та подальшої обробки його даних попередньо здійснювалася операція кодування. Метод кодування використовується для перетворення розмірних величин факторів, які можуть мати різні масштаби та одиниці вимірювання, в безрозмірні кодовані значення. Це спрощує аналіз та порівняння впливу різних факторів у багатфакторних експериментах. Кодування дозволяє стандартизувати фактори, що полегшує обробку та інтерпретацію даних, забезпечує зручність у виконанні математичних операцій та аналітичних розрахунків, а також допомагає в ідентифікації та оцінці взаємодії між різними факторами. За методикою, представленою в [126], визначалися натуральні та кодовані фактори, що пов'язані між собою певними співвідношеннями.

Шнековий екструдер обладнання тривимірного друку, що досліджується, є багатфакторною системою, яка характеризується таким вихідним параметром, як об'ємна продуктивність  $Q_{\text{шн.е.}}$ . Для зв'язку режиму роботи шнекового екструдера з об'ємною продуктивністю, основною метою є досягнення балансу між швидкістю друку та якістю виробу. Тому ключовими факторами для регулювання об'ємної продуктивності є: частота обертання шнека  $n_{\text{шн.}}$  та температура нагрівання екструдера  $T_{\text{нагр.}}$ .

Залежність об'ємної продуктивності від цих двох параметрів може бути

представлена у вигляді математичного виразу або емпіричної моделі:

$$Q_{\text{шн.е.}} = f(n_{\text{шн.}}, T_{\text{нагр.}}). \quad (4.6)$$

Однак для створення точної моделі потрібно враховувати ще властивості матеріалу, а саме розмір часток полімеру  $d_{\text{ч.}}$ , що будуть подаватися в завантажувальну зону екструдера. У цьому дослідженні в якості вихідної сировини шнекового екструдера використовувався ABS пластик.

Головна мета полягає у відшуванні оптимальної комбінації визначної кількості факторів і діапазону їх зміни, що дозволяє досягти найкращого значення обраного показника, у цьому випадку – об'ємної продуктивності .

Отже, об'ємна продуктивність  $Q_{\text{шн.е.}}$  виступає як параметр оптимізації, а зазначені параметри як обмеження. Використовуючи три незалежні фактори, які варіюються на трьох рівнях кожен необхідно встановити залежність:

$$Q_{\text{шн.е.}} = f(n_{\text{шн.}}, T_{\text{нагр.}}, d_{\text{ч.}}). \quad (4.7)$$

Така модель дозволяє більш точно оцінити, як зміна частоти обертання шнека, температури нагрівання та розміри матеріалу, що переробляється впливають на об'ємну продуктивність  $Q_{\text{шн.е.}}$ .

Діапазони змін факторів (мінімальні та максимальні межі) були визначені з урахуванням попередніх розрахунків і даних, отриманих з експериментальних досліджень. Ці межі покривають обсяг значень факторів, які є релевантними для використання в шнекових екструдерах обладнання тривимірного друку [10]:  $d_{\text{ч.}}=1,5\dots2,5$  мм;  $n_{\text{шн.}}=3,0\dots9,0$  об/хв;  $T_{\text{нагр.}}=230\dots250$  °С.

Для знаходження оптимальної об'ємної продуктивності шнекового екструдера  $Q_{\text{шн.е.}}$  та визначення впливу на неї діаметра подрібнених часток полімерного матеріалу ABS  $d_{\text{ч.}}$ , частоти обертання шнека  $n_{\text{шн.}}$  та температури нагрівання екструдера  $T_{\text{нагр.}}$  були здійснені експериментальні дослідження, засновані на методології планування експерименту за допомогою некомпозиційних планів другого порядку, зокрема використовувались вибірки з планів типу  $3^k$ .

Ціль експериментального вивчення характеристик робочого процесу шнекового екструдера обладнання тривимірного друку полягає у встановленні,

як вхідні параметри впливають на об'ємну продуктивність (4.7), визначенні її оптимального рівня та розробці регресійного рівняння, яке адекватно відображає результати цих дослідів.

У ході експерименту були визначені основні рівні та діапазони змін факторів, величини яких представлені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

## Значення рівнів та інтервалів варіювання факторів

Найменування та позначення факторів	Рівні варіювання			Інтервали варіювання
	Нижній рівень -1	Основний рівень 0	Верхній рівень +1	
Діаметр часток пластику ABS $d_c$ , мм ( $x_1$ )	1,5	2,0	2,5	0,5
Частота обертання шнека, $n_{шн.}$ , об/хв ( $x_2$ )	3,0	6,0	9,0	3,0
Температура нагрівання екструдера $t_{нагр.}$ , °C ( $x_3$ )	230	240	250	10

Для розробки плану експерименту та створення регресійного рівняння була застосована програма «Optimization Model&Planning Experiment» [126], у програмі використовувався некомпозиційний план другого порядку, здійснена вибірка за планом типу  $3^k$ . Використовуючи зазначену програму та вводячи в неї кількість факторів разом з їх мінімальними та максимальними рівнями, була встановлена необхідна кількість експериментів. Також за допомогою програми були сформовані матриці для планування експериментів та відповідних значень. На основі цих даних були розраховані коефіцієнти для рівняння регресії, дисперсії цих коефіцієнтів та дисперсія оптимізованого параметра, а також отримане відповідне рівняння регресії.

Згідно з некомпозиційним планом другого порядку для трьох факторів передбачено виконання 15 дослідів. В центральній точці плану, коли всі фактори знаходяться на нульовому рівні ( $x_1 = x_2 = x_3 = 0$ ), передбачено проведення трьох дослідів (досліди 5, 10, 15). Матриця плану наведена в таблиці Н.1 (додаток Н).

У таблиці Н.2 (додаток Н) наведено матрицю плану, що була отримана із



застосуванням програми «Optimization Model&Planning Experiment».

У таблиці Н.3 (додаток Н) наведено коефіцієнти рівняння регресії, розраховані з використанням програмного забезпечення «Optimization Model&Planning Experiment».

У таблиці Н.4 (додаток Н) представлено отримані дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії. Дисперсія  $S_y^2$  параметра оптимізації після зроблених розрахунків склала  $S_y^2 = 10,061803426768165$ .

Щоб перевірити значення дисперсії  $S_y^2$  оптимізованого параметра, яке було отримано за допомогою програми «Optimization Model&Planning Experiment», було здійснено його розрахунок за методикою, описаною в [126]. Для цього було складено додаткову таблицю (табл.Н.5, додаток Н)). Було використано суму квадратів  $S_E$  для обчислення дисперсії  $S_y^2$  оптимізованого параметра на основі результатів експериментів, проведених у центральній точці плану.

Дисперсію  $S_y^2$  параметра оптимізації було визначено з числом степенів вільності:

$$f_2 = n_0 - 1 = 3 - 1 = 2, \quad (4.8)$$

де  $n_0$  – число паралельних дослідів в центрі плану,  $n_0 = 3$ .

Значення дисперсії  $S_y^2$  параметра оптимізації, знайдене за допомогою розрахунків, відповідає значенню, отриманому програмою «Optimization Model&Planning Experiment».

Процес, що досліджується, було описано поліноміальним рівнянням другого порядку в кодованому вигляді за допомогою програми «Optimization Model&Planning Experiment»:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2, \quad (4.9)$$

де  $b_0, b_1, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$  – коефіцієнти рівняння регресії.

Для того, щоб визначити значущість кожного коефіцієнта в рівнянні регресії, порівнювалося абсолютне значення цих коефіцієнтів з їх відповідними довірчими інтервалами. Довірчі інтервали для коефіцієнтів розраховуються згідно з формулою:

$$\Delta b_i = \pm t_T \cdot S_{b_i}, \quad (4.10)$$

де  $t_T$  – значення t-критерію Стюдента, яке вибирається з таблиць відповідно до заданого рівня значимості та кількості ступенів вільності  $f_2$ , що використовуються для обчислення дисперсії  $S_y^2$  параметра оптимізації (для  $f_2 = 2$  та рівня значимості 5%  $t_T = 4,3$ );  $S_{bi}$  – похибка визначення  $i$ -го коефіцієнта регресії.

Похибка визначення  $i$ -го коефіцієнта регресії знаходиться за формулою:

$$S_{bi} = +\sqrt{S_{bi}^2}, \quad (4.11)$$

де  $S_{bi}^2$  – дисперсія  $i$ -го коефіцієнта регресії.

Коефіцієнт у рівнянні регресії розглядається як значимий, коли його абсолютне значення перевищує величину його довірчого інтервалу. У випадку, коли абсолютне значення коефіцієнта є меншим за довірчий інтервал, цей коефіцієнт вважається статистично незначущим і може бути вилучений з рівняння регресії. Довірчі інтервали для коефіцієнтів рівняння регресії визначаються згідно з формулою (4.10):

$$\Delta b_{i1} = \pm 6,81; \Delta b_i = \pm 4,82; \Delta b_{ii} = \pm 7,09; \Delta b_0 = \pm 7,87.$$

Порівняння коефіцієнтів рівняння регресії з довірчими інтервалами показало, що коефіцієнти  $b_3, b_{12}, b_{22}, b_{23}, b_{33}$  менші за довірчий інтервал. Хоча ці коефіцієнти є статистично незначущими, прийнято рішення не виключати їх з рівняння регресії. Це можна обґрунтувати тим, що на сьогодні не існує теоретичної залежності, яка описує вплив розміру подрібнених часток полімеру, частоти обертання шнеку та температури нагрівання матеріалу на об'ємну продуктивність шнекового екструдера. Тому слід побудувати повну модель, яка включає всі потенційно важливі змінні, незалежно від їх статистичної значущості. Прийнято допущення, що ці коефіцієнти вносять свій вплив на залежну величину.

Підставивши коефіцієнти рівняння регресії (табл.Н.3, додаток Н), у рівняння (4.9), було отримано:

$$y = 108,4580 + 7,9212 \cdot x_1 + 55,9172 \cdot x_2 + 2,9336 \cdot x_3 + 5,4187 \cdot x_1 \cdot x_2 + 8,4380 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,2149 \cdot x_2 \cdot x_3 + 6,8574 \cdot x_1^2 + 1,5627 \cdot x_2^2 + 0,8321 \cdot x_3^2 \quad (4.12)$$

Рівняння регресії в розкодованому вигляді має наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
y = & b_0 + b_1 \cdot \left( \frac{x_{i1} - 2,0}{0,5} \right) + b_2 \cdot \left( \frac{x_{i2} - 6,0}{3,0} \right) + b_3 \cdot \left( \frac{x_{i3} - 240,0}{10,0} \right) + b_{12} \cdot \left( \frac{x_{i1} - 2,0}{0,5} \right) \times \\
& \times \left( \frac{x_{i2} - 6,0}{3,0} \right) + b_{13} \cdot \left( \frac{x_{i1} - 2,0}{0,5} \right) \cdot \left( \frac{x_{i3} - 240,0}{10,0} \right) + b_{23} \cdot \left( \frac{x_{i2} - 6,0}{3,0} \right) \cdot \left( \frac{x_{i3} - 240,0}{10,0} \right) + (4.13) \\
& + b_{11} \cdot \left( \frac{x_{i1} - 2,0}{0,5} \right)^2 + b_{22} \cdot \left( \frac{x_{i2} - 6,0}{3,0} \right)^2 + b_{33} \cdot \left( \frac{x_{i3} - 240,0}{10,0} \right)^2.
\end{aligned}$$

Підставивши коефіцієнти, отримаємо:

$$\begin{aligned}
y = & 108,4580 + 7,9212 \cdot \left( \frac{x_{i1} - 2,0}{0,5} \right) + 55,9172 \cdot \left( \frac{x_{i2} - 6,0}{3,0} \right) + 2,9336 \times \\
& \times \left( \frac{x_{i3} - 240,0}{10,0} \right) + 5,4187 \cdot \left( \frac{x_{i1} - 2,0}{0,5} \right) \cdot \left( \frac{x_{i2} - 6,0}{3,0} \right) + 8,4380 \cdot \left( \frac{x_{i1} - 2,0}{0,5} \right) \times \\
& \times \left( \frac{x_{i3} - 240,0}{10,0} \right) - 0,2149 \cdot \left( \frac{x_{i2} - 6,0}{3,0} \right) \cdot \left( \frac{x_{i3} - 240,0}{10,0} \right) + 6,8574 \cdot \left( \frac{x_{i1} - 2,0}{0,5} \right)^2 + (4.14) \\
& + 1,5627 \cdot \left( \frac{x_{i2} - 6,0}{3,0} \right)^2 + 0,8321 \cdot \left( \frac{x_{i3} - 240,0}{10,0} \right)^2.
\end{aligned}$$

Перевірку адекватності розробленого поліноміального рівняння другого порядку здійснюємо за допомогою  $F$ -критерію Фішера. Для цього спершу обчислюємо дисперсію  $S_{ad}^2$  адекватності, використовуючи наступну формулу:

$$S_{ad}^2 = \frac{S_R - S_E}{f_1}, \quad (4.15)$$

де  $S_R$  – це сума квадратів відхилень між обчисленими значеннями  $Y_P$  та експериментально отриманими  $Y_e$  функції відгуку у всіх точках плану;  $f_1$  – кількість степенів свободи;

$$f_1 = N - k' - (n_0 - 1), \quad (4.16)$$

де  $N$  – загальна кількість експериментів у матриці планування;  $N = 15$ ;  $k'$  – число коефіцієнтів рівняння регресії (3),  $k' = 10$ .

Обчислені значення  $Y_P$  функції відгуку, отримані з використанням рівняння регресії (4.13), середньоарифметичне експериментальне значення, отримане з трьох паралельних вимірювань  $Y_e$ ; розбіжності між експериментальними та обчисленими значеннями  $Y_P - Y_e$ , а також  $S_R$  наведені в таблиці Н.6 (додаток Н).

Дисперсію  $S_{ad}^2$  адекватності було розраховано за формулою (4.15):

$$S_{ad}^2 = \frac{589,510 - 18,86}{15 - 10 - (3 - 1)} = 190,21.$$

Дисперсію адекватності  $S_{ad}^2$  визначено з числом степенів свободи  $f_1 = 3$ .

Розрахункове значення  $F$ -критерію було розраховано за формулою:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} = \frac{190,21}{10,06} = 18,90. \quad (4.17)$$

При п'яти відсотковому рівні значимості та числах степенів свободи  $f_1 = 3$  та  $f_2 = 2$  табличне значення  $F$ -критерію дорівнює  $F_T = 19,2$ . Рівняння регресії визнається адекватним за умови, коли дотримується наступне правило:  $F_p < F_T = 18,9 < 19,2$ . Отже, рівняння регресії є адекватним.

Замінюючи натуральними величинами у рівнянні (4.14) кодовані значення факторів було отримано:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ин.е.}} = & 108,4580 + 7,9212 \cdot \left( \frac{d_{\text{ч.}} - 2,0}{0,5} \right) + 55,9172 \cdot \left( \frac{n_{\text{ин.}} - 6,0}{3,0} \right) + 2,9336 \times \\ & \times \left( \frac{T_{\text{нагр.}} - 240,0}{10,0} \right) + 5,4187 \cdot \left( \frac{d_{\text{ч.}} - 2,0}{0,5} \right) \cdot \left( \frac{n_{\text{ин.}} - 6,0}{3,0} \right) + 8,4380 \cdot \left( \frac{d_{\text{ч.}} - 2,0}{0,5} \right) \times \\ & \times \left( \frac{T_{\text{нагр.}} - 240,0}{10,0} \right) - 0,2149 \cdot \left( \frac{n_{\text{ин.}} - 6,0}{3,0} \right) \cdot \left( \frac{T_{\text{нагр.}} - 240,0}{10,0} \right) + 6,8574 \times \\ & \times \left( \frac{d_{\text{ч.}} - 2,0}{0,5} \right)^2 + 1,5627 \cdot \left( \frac{n_{\text{ин.}} - 6,0}{3,0} \right)^2 + 0,8321 \cdot \left( \frac{T_{\text{нагр.}} - 240,0}{10,0} \right)^2. \end{aligned} \quad (4.18)$$

Коефіцієнти рівняння регресії (4.12) в кодованому вигляді показують величину впливу факторів ( $d_{\text{ч.}}, n_{\text{ин.}}, T_{\text{нагр.}}$ ) на вихідний параметр  $Q_{\text{ин.е.}}$  та є кількісною його мірою.

Для наочного представлення результатів трифакторного експерименту в аксонометрії були побудовані графічні залежності досліджуваної поверхні відгуку. Для їх побудови використовувався Colab, відомий також як Google Colaboratory та є безкоштовною хмарною службою від Google, яка дозволяє писати та виконувати Python-код через браузер.

Така діаграма демонструє взаємодію трьох факторів на об'ємну продуктивність  $Q_{\text{ин.е.}}$ . Один із факторів було залишено сталим, оскільки

одночасне змінювання трьох факторів утворює просторову фігуру, яку важко візуалізувати. Незмінним фактором було вибрано розмір часток полімеру, що завантажується в шнековий екструдер 3D-принтера. Було зафіксовано його на відповідних рівнях варіювання.

Графіки залежності функції відгуку об'ємної продуктивності  $Q_{\text{ин.е.}} = f(n_{\text{ин.}}, T_{\text{нагр.}}, d_{\text{ч.}})$  при частоті обертання шнека  $n_{\text{ин.}}$  та температурі нагрівання екструдера  $T_{\text{нагр.}}$  на рівні від «-1» до «+1» при незмінному розмірі часток полімеру  $d_{\text{ч.}}$  ( $d_{\text{ч.}} = 1,5 \text{ мм}$ ,  $d_{\text{ч.}} = 2,0 \text{ мм}$ ,  $d_{\text{ч.}} = 2,5 \text{ мм}$ ) наведено на рисунку 4.16.

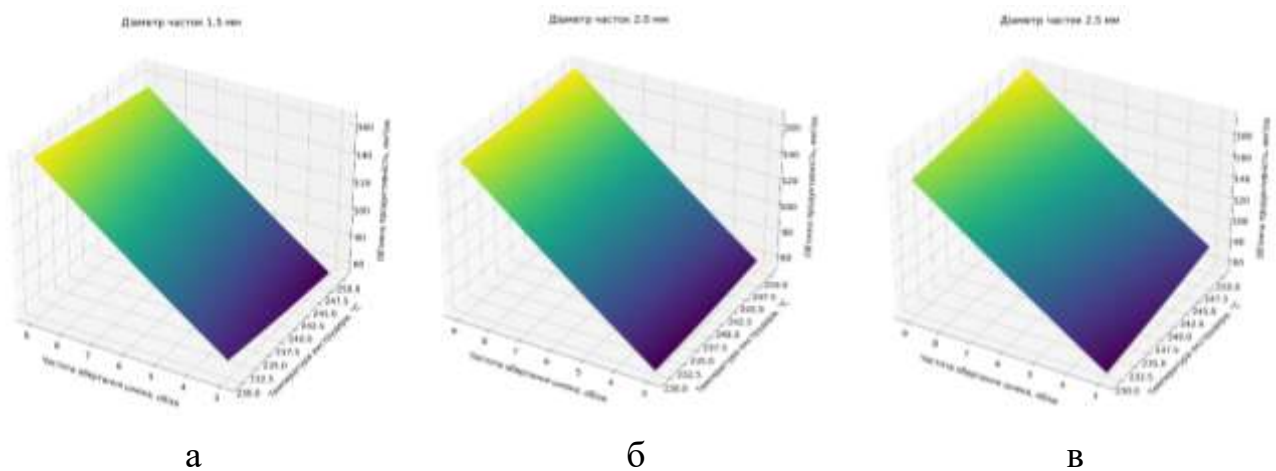


Рисунок 4.16 – Графіки залежності функції відгуку об'ємної продуктивності  $Q_{\text{ин.е.}} = f(n_{\text{ин.}}, T_{\text{нагр.}}, d_{\text{ч.}})$  при частоті обертання шнека  $n_{\text{ин.}}$  та температурі нагрівання  $T_{\text{нагр.}}$  на рівні від «-1» до «+1» при незмінному розмірі часток полімеру ABS  $d_{\text{ч.}}$ : а – 1,5 мм; б – 2,0 мм; в – 2,5 мм

Графіки залежності об'ємної продуктивності  $Q_{\text{ин.е.}}$  від частоти обертання  $n_{\text{ин.}}$  при різних розмірах часток пластику  $d_{\text{ч.}}$  ABS наведено на рисунку 4.17.

Графіки залежності об'ємної продуктивності  $Q_{\text{ин.е.}}$  від частоти обертання  $n_{\text{ин.}}$  при різних температурах нагрівання екструдера  $T_{\text{нагр.}}$  показано на рисунку 4.18.

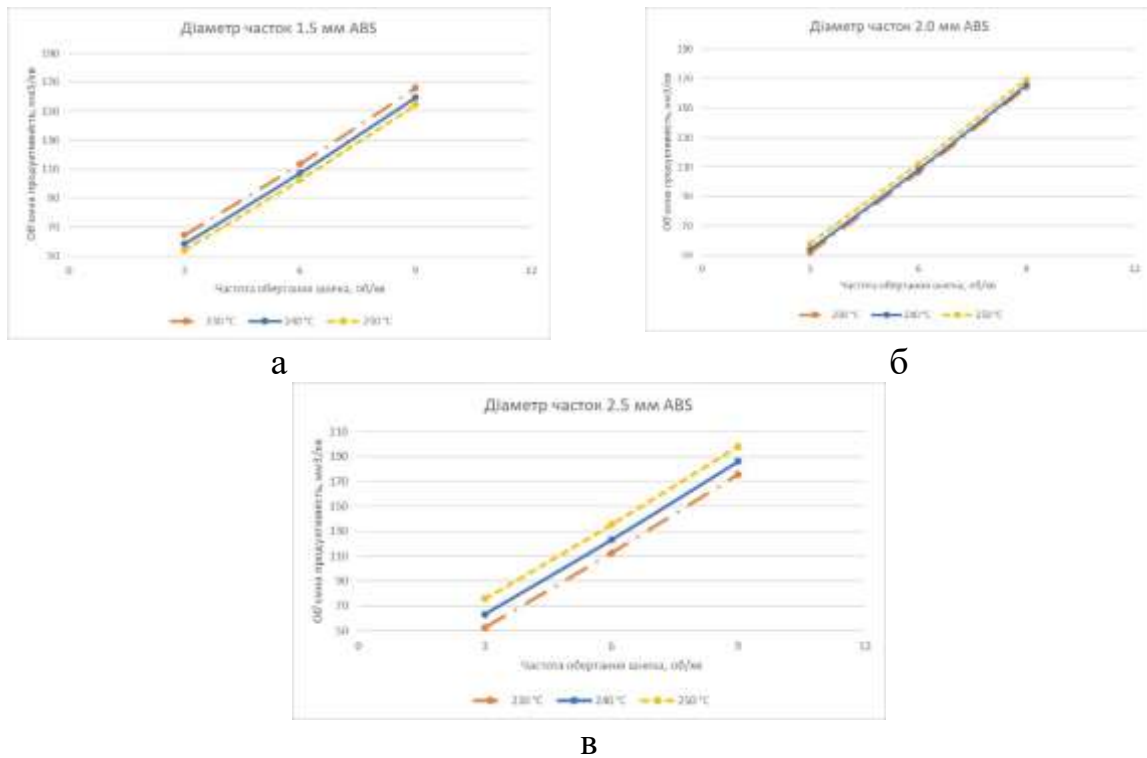


Рисунок 4.17 – Графіки залежності об'ємної продуктивності  $Q_{ин.е.}$  від частоти обертання  $n_{ин.}$  при різних розмірах часток пластику ABS: а – 1,5 мм; б – 2,0 мм; в – 2,5 мм

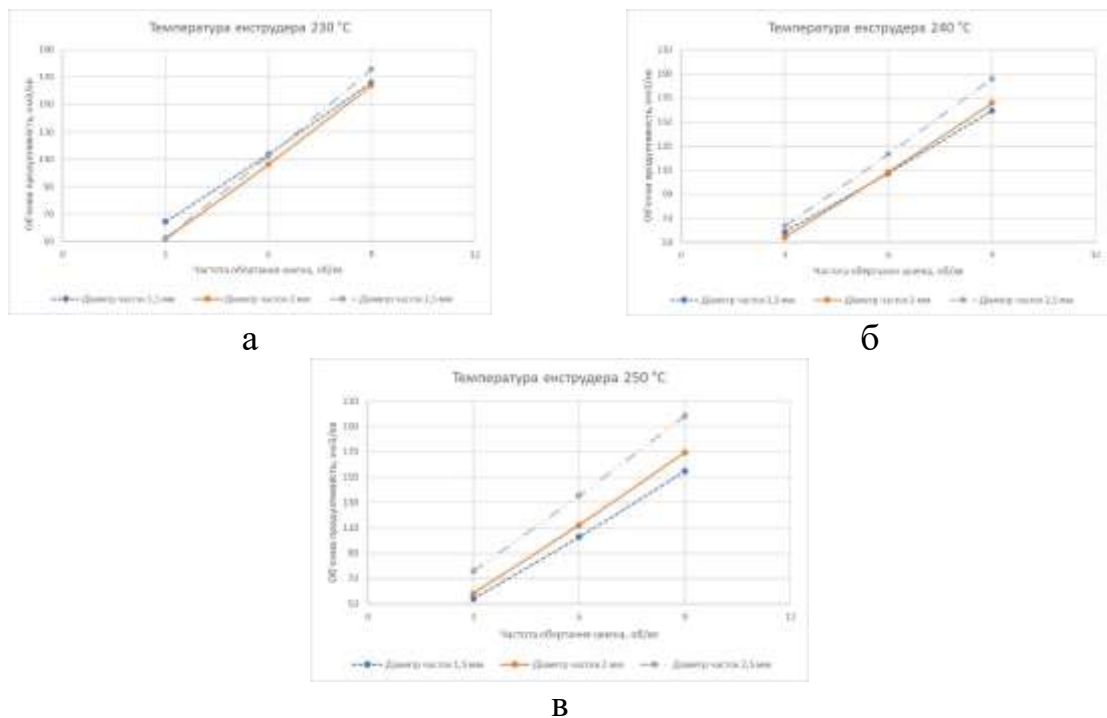


Рисунок 4.18 – Графіки залежності об'ємної продуктивності  $Q_{ин.е.}$  від частоти обертання  $n_{ин.}$  при різних температурах нагрівання екструдера  $T_{нагр.}$ : а – 230 °С; б – 240 °С; в – 250 °С

Аналіз графіків, наведених на рисунках 4.16-4.18, дав змогу визначити значення об'ємної продуктивності при різних поєднаннях незалежних факторів при переробці пластику ABS. Ці значення наведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Значення об'ємної продуктивності при різних поєднаннях незалежних факторів

Значення	Об'ємна продуктивність $Q_{\text{шн.е.}}$ , мм <sup>3</sup> /хв	Параметри		
		Діаметр часток пластику ABS $d_{\text{ч.}}$ , мм	Частота обертання $n_{\text{шн.}}$ , об/хв	Температура екструдера $T_{\text{нагр.}}$ , °С
Максимальне значення	198,123	2,5	9	250
Мінімальне значення	51,787	2	3	230
Діапазон вимірювання	51,787-263,932	1,5-2,5	3-9	230-250
Оптимальне значення	198,123	2,5	9	250

Також були проведені експериментальні дослідження по знаходженню оптимальної об'ємної продуктивності шнекового екструдера 3D-принтера  $Q_{\text{шн.е.}}$  та визначення впливу на неї діаметра часток полімеру TPU  $d_{\text{ч.}}$ , частоти обертання шнека  $n_{\text{шн.}}$  та температури нагрівання екструдера  $T_{\text{нагр.}}$ . Вона знаходилася аналогічно до пунктів, описаних вище, при визначенню об'ємної продуктивності шнекового екструдера обладнання тривимірного друку при переробці пластику ABS.

Основні рівні та діапазони змін факторів були такі ж самі як і при переробці пластику ABS. Їх величини представлені у таблиці Н.7 (додаток Н). Матриця плану наведена в таблиці Н.8 (додаток Н). Матрицю плану, що була отримана із застосуванням програми «Optimization Model&Planning Experiment» представлено в таблиці Н.9. У таблиці Н.10 наведено коефіцієнти рівняння регресії, розраховані з використанням програмного забезпечення «Optimization Model&Planning Experiment». Отримані дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії наведені в таблиці Н.11. Дисперсія  $Sy^2$  параметра оптимізації після зроблених

розрахунків склала  $Sy^2 = 5,92089677963304$ .

Дисперсію  $S_y^2$  параметра оптимізації було визначено з числом степенів вільності, використовуючи формулу (4.8):

$$f_2 = 3 - 1 = 2,$$

Додаткова таблиця Н.12 для розрахунку  $S_y^2$  наведена в додатку Н.

Процес, що досліджується, було описано поліноміальним рівнянням другого порядку в кодованому вигляді (4.9). Довірчі інтервали  $\Delta b_i$  для коефіцієнтів розраховувалися згідно з формулою (4.11) при  $f_2 = 2$  та рівню значимості 5%  $t_T = 4,3$ . Похибка визначення  $i$ -го коефіцієнта регресії визначалася за рівнянням (4.11).

Довірчі інтервали для коефіцієнтів рівняння регресії склали:

$$\Delta b_{i1} = \pm 5,23; \Delta b_i = \pm 3,69; \Delta b_{ii} = \pm 5,45; \Delta b_0 = \pm 6,04.$$

Порівняння коефіцієнтів рівняння регресії з довірчими інтервалами показало, що коефіцієнти  $b_3, b_{13}, b_{23}$  менші за довірчий інтервал. Хоча ці коефіцієнти є статистично не значимими, прийнято рішення також не виключити їх з рівняння регресії.

Підставивши коефіцієнти рівняння регресії (табл.Н.10, додаток Н) в рівняння (4.9), було отримано:

$$y = 25,2600 + 17,4219 \cdot x_1 + 19,3285 \cdot x_2 - 2,9521 \cdot x_3 + 12,2713 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1,2945 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,6978 \cdot x_2 \cdot x_3 + 8,9903 \cdot x_1^2 + 7,9560 \cdot x_2^2 - 5,7398 \cdot x_3^2 \quad (4.20)$$

Рівняння регресії в розкодованому виді має наступний вигляд:

$$y = b_0 + b_1 \cdot \left( \frac{x_{i1} - 2,0}{0,5} \right) + b_2 \cdot \left( \frac{x_{i2} - 6,0}{3,0} \right) + b_3 \cdot \left( \frac{x_{i3} - 230,0}{10,0} \right) + b_{12} \cdot \left( \frac{x_{i1} - 2,0}{0,5} \right) \times \\ \times \left( \frac{x_{i2} - 6,0}{3,0} \right) + b_{13} \cdot \left( \frac{x_{i1} - 2,0}{0,5} \right) \cdot \left( \frac{x_{i3} - 230,0}{10,0} \right) + b_{23} \cdot \left( \frac{x_{i2} - 6,0}{3,0} \right) \cdot \left( \frac{x_{i3} - 230,0}{10,0} \right) + (4.21) \\ + b_{11} \cdot \left( \frac{x_{i1} - 2,0}{0,5} \right)^2 + b_{22} \cdot \left( \frac{x_{i2} - 6,0}{3,0} \right)^2 + b_{33} \cdot \left( \frac{x_{i3} - 230,0}{10,0} \right)^2.$$

Підставивши коефіцієнти, отримаємо:



$$\begin{aligned}
y = & 25,2600 + 17,4219 \cdot \left( \frac{x_{i1} - 2,0}{0,5} \right) + 19,3285 \cdot \left( \frac{x_{i2} - 6,0}{3,0} \right) - 2,9521 \times \\
& \times \left( \frac{x_{i3} - 230,0}{10,0} \right) + 12,2713 \cdot \left( \frac{x_{i1} - 2,0}{0,5} \right) \cdot \left( \frac{x_{i2} - 6,0}{3,0} \right) + 1,2945 \cdot \left( \frac{x_{i1} - 2,0}{0,5} \right) \times \\
& \times \left( \frac{x_{i3} - 230,0}{10,0} \right) + 0,6978 \cdot \left( \frac{x_{i2} - 6,0}{3,0} \right) \cdot \left( \frac{x_{i3} - 230,0}{10,0} \right) + 8,9903 \cdot \left( \frac{x_{i1} - 2,0}{0,5} \right)^2 + \\
& + 7,9560 \cdot \left( \frac{x_{i2} - 6,0}{3,0} \right)^2 - 5,7398 \cdot \left( \frac{x_{i3} - 230,0}{10,0} \right)^2.
\end{aligned} \tag{4.22}$$

Дисперсія  $S_{ad}^2$  адекватності була розрахована за формулою (4.15), а кількість ступенів свободи – за (4.16).

Обчислені значення  $Y_p$  функції відгуку, отримані з використанням рівняння регресії (4.13); середньоарифметичне експериментальне значення, отримане з трьох паралельних вимірювань  $Y_e$ ; розбіжності між експериментальними та обчисленими значеннями  $Y_p - Y_e$ , а також  $S_R$  наведені в таблиці Н.13 (додаток Н).

Дисперсію  $S_{ad}^2$  адекватності було розраховано за формулою (4.16):

$$S_{ad}^2 = \frac{589,510 - 18,86}{15 - 10 - (3 - 1)} = 109,18.$$

Дисперсію адекватності  $S_{ad}^2$  визначено з числом ступенів свободи  $f_1 = 3$ .

Розрахункове значення  $F$ -критерію було розраховано за формулою (4.17):

$$F_p = \frac{190,21}{10,06} = 18,44.$$

При п'ятивідсотковому рівні значимості та числах ступенів свободи  $f_1 = 3$  та  $f_2 = 2$  табличне значення  $F$ -критерію дорівнює  $F_T = 19,2$ . Рівняння регресії визнається адекватним за умови що дотримується наступне правило:  $F_p < F_T = 18,44 < 19,2$ . Отже, рівняння регресії є адекватним.

Замінивши натуральними величинами у рівнянні (4.22) кодовані значення факторів, було отримано:

$$\begin{aligned}
Q_{\text{ин.е.}} = & 25,2600 + 17,4219 \cdot \left( \frac{d_{\text{ч.}} - 2,0}{0,5} \right) + 19,3285 \cdot \left( \frac{n_{\text{ин.}} - 6,0}{3,0} \right) - 2,9521 \times \\
& \times \left( \frac{T_{\text{нагр.}} - 230,0}{10,0} \right) + 12,2713 \cdot \left( \frac{d_{\text{ч.}} - 2,0}{0,5} \right) \cdot \left( \frac{n_{\text{ин.}} - 6,0}{3,0} \right) + 1,2945 \cdot \left( \frac{d_{\text{ч.}} - 2,0}{0,5} \right) \times \\
& \times \left( \frac{T_{\text{нагр.}} - 230,0}{10,0} \right) + 0,6978 \cdot \left( \frac{n_{\text{ин.}} - 6,0}{3,0} \right) \cdot \left( \frac{T_{\text{нагр.}} - 230,0}{10,0} \right) + 8,9903 \times \\
& \times \left( \frac{d_{\text{ч.}} - 2,0}{0,5} \right)^2 + 7,9560 \cdot \left( \frac{n_{\text{ин.}} - 6,0}{3,0} \right)^2 - 5,7398 \cdot \left( \frac{T_{\text{нагр.}} - 230,0}{10,0} \right)^2.
\end{aligned} \tag{4.23}$$

Коефіцієнти рівняння регресії (4.20) в кодованому вигляді показують величину впливу факторів ( $d_{\text{ч.}}$ ,  $n_{\text{ин.}}$ ,  $T_{\text{нагр.}}$ ) на вихідний параметр  $Q_{\text{ин.е.}}$  при переробці пластику TPU та є кількісною його мірою.

Графіки залежності функції відгуку об'ємної продуктивності  $Q_{\text{ин.е.}} = f(n_{\text{ин.}}, T_{\text{нагр.}}, d_{\text{ч.}})$  при частоті обертання шнека  $n_{\text{ин.}}$  та температурі нагрівання екструдера  $T_{\text{нагр.}}$  на рівні від «-1» до «+1» при незмінному розміру часток пластику TPU ( $d_{\text{ч.}} = 1,5 \text{ мм}$ ,  $d_{\text{ч.}} = 2,0 \text{ мм}$ ,  $d_{\text{ч.}} = 2,5 \text{ мм}$ ) представлено на рисунку 4.19.

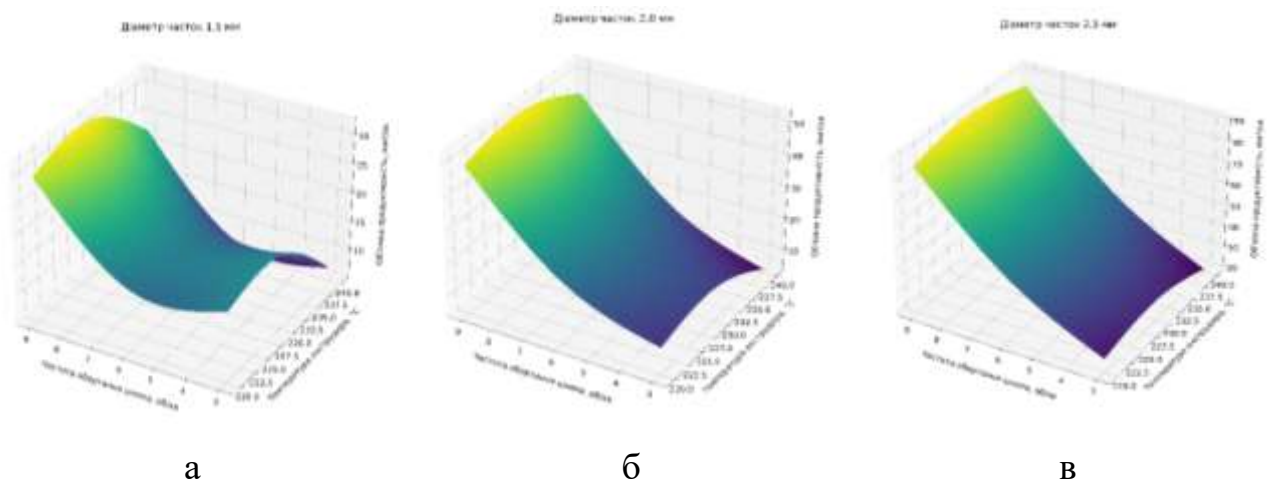


Рисунок 4.19 – Графіки залежності функції відгуку об'ємної продуктивності  $Q_{\text{ин.е.}} = f(n_{\text{ин.}}, T_{\text{нагр.}}, d_{\text{ч.}})$  при частоті обертання шнека  $n_{\text{ин.}}$  та температурі нагрівання  $T_{\text{нагр.}}$  на рівні від «-1» до «+1» при незмінному розміру часток пластику TPU  $d_{\text{ч.}}$ : а – 1,5 мм; б – 2,0 мм; в – 2,5 мм

Графіки залежності об'ємної продуктивності  $Q_{\text{ин.е.}}$  від частоти обертання  $n_{\text{ин.}}$  при різних розмірах часток пластику TPU наведено на рисунку 4.20.

Графіки залежності об'ємної продуктивності  $Q_{\text{ин.е.}}$  від частоти обертання  $n_{\text{ин.}}$  при різних температурах нагрівання екструдера  $T_{\text{нагр.}}$  показано на рисунку 4.21.

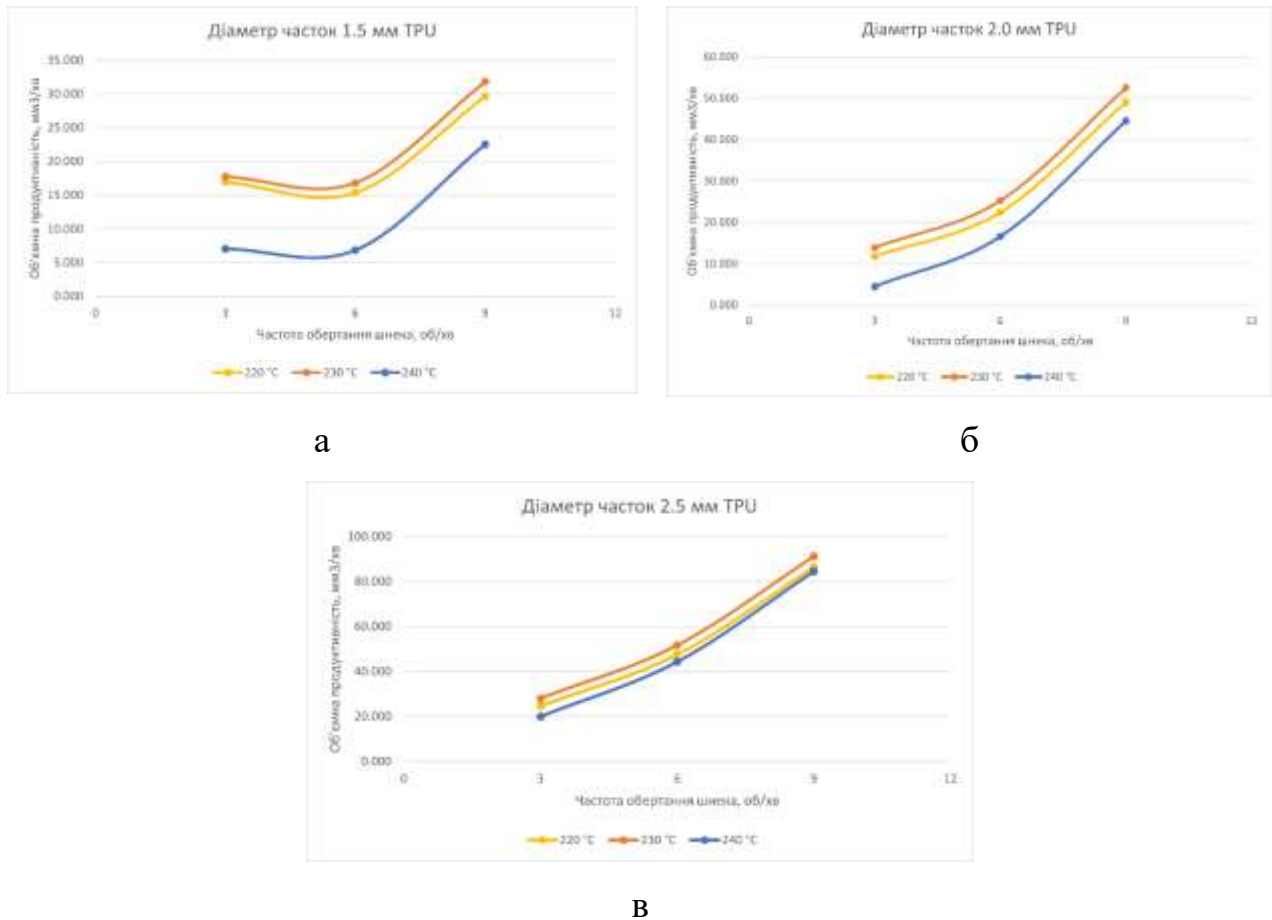
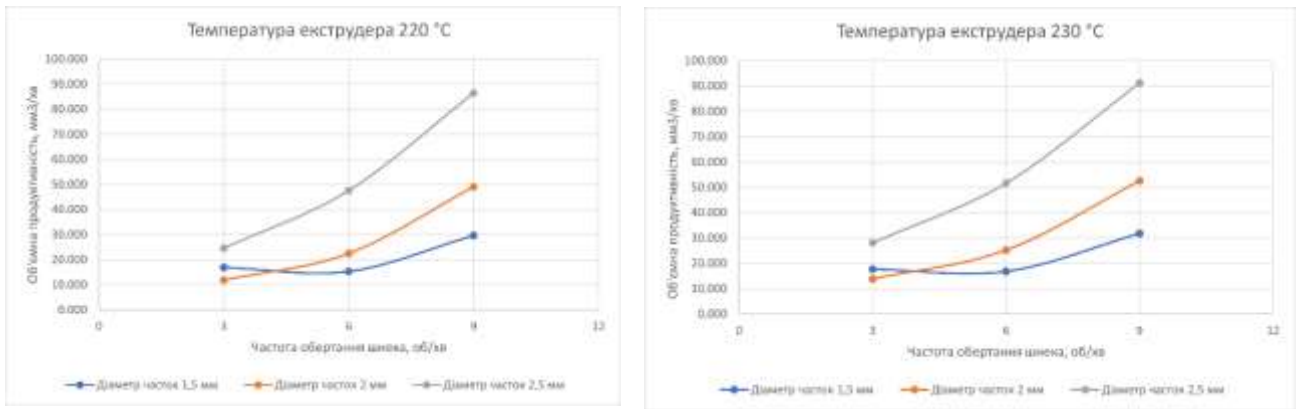


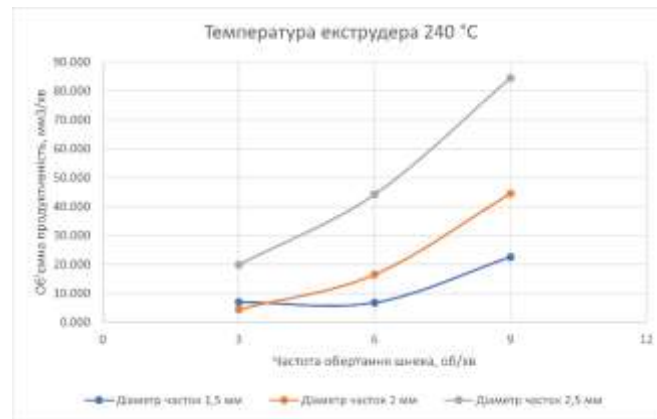
Рисунок 4.20 – Графіки залежності об'ємної продуктивності  $Q_{\text{ин.е.}}$  від частоти обертання  $n_{\text{ин.}}$  при різних розмірах часток пластику TPU: а – 1,5 мм; б – 2,0 мм; в – 2,5 мм

Аналіз графіків, наведених на рисунках 4.19-4.20, дав змогу визначити значення об'ємної продуктивності для TPU пластику при різних поєднаннях незалежних факторів. Ці значення наведені в табл.4.6.



а

б



в

Рисунок 4.21 – Графіки залежності об'ємної продуктивності  $Q_{ин.е.}$  від частоти обертання  $n_{ин.}$  при різних температурах нагрівання екструдера  $T_{нагр.}$ : а – 220 °C;

б - 230 °C; в - 240 °C

Таблиця 4.6

Значення об'ємної продуктивності при різних поєднаннях незалежних факторів

Значення	Об'ємна продуктивність $Q_{ин.е.}$ , мм <sup>3</sup> /хв	Параметри		
		Діаметр часток пластику TPU $d_{ч.}$ , мм	Частота обертання $n_{ин.}$ , об/хв	Температура екструдера $T_{нагр.}$ , °C
Максимальне значення	91,228	2,5	9	230
Мінімальне значення	4,498	2	3	240
Діапазон вимірювання	4,498-91,228	1,5-2,5	3-9	220-240
Оптимальне значення	91,228	2,5	9	230

### 4.3. Порівняння теоретичного та експериментального значень об'ємної продуктивності шнекового екструдера

Для підтвердження адекватності отриманої математичної моделі (2.58) залежності об'ємної продуктивності для ABS пластику від параметрів шнекового екструдера було проведено порівняння виконаних обчислень з експериментальними даними.

Отримані результати представлені на рисунку 4.22.

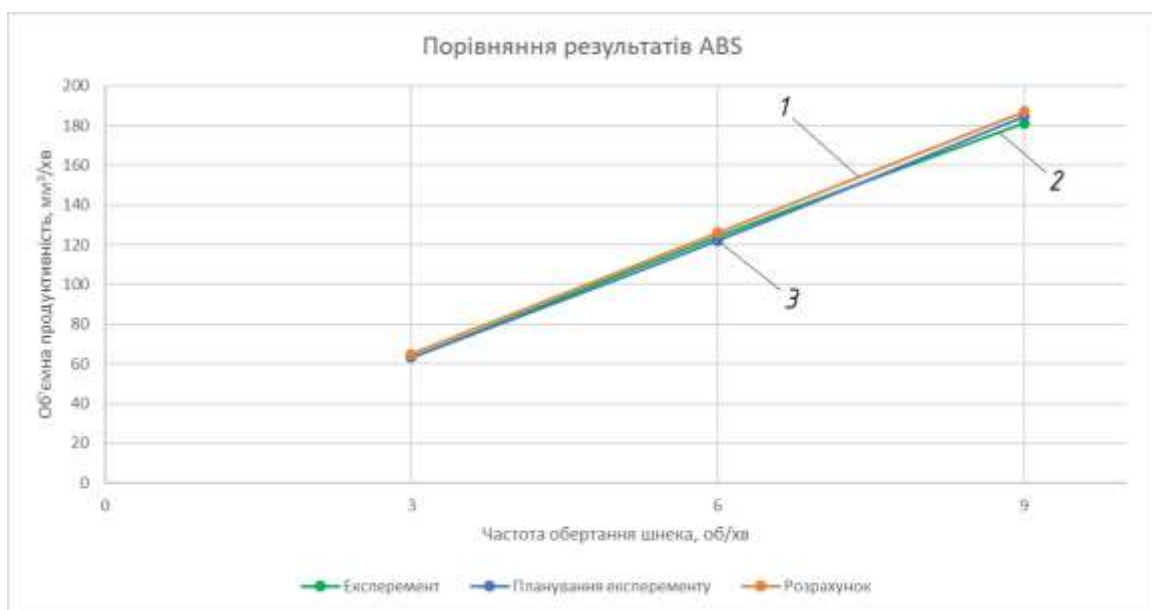


Рисунок 4.22 – Результати визначення залежності об'ємної продуктивності від частоти обертання шнека екструдера: 1 – розрахункова (формула 2.58); 2 – експериментальна (при плануванні експерименту); 3 – розрахункова на основі рівняння регресії (формула 4.18)

Похибки між розрахунковими та експериментальним значеннями об'ємної продуктивності шнекового екструдера для ABS пластику були розраховані за формулою (3.2). У результаті розрахунків похибка між розрахунковим значення (формула 2.58) та експериментальним складає 3,5 %, а між розрахунковим на основі рівняння регресії (формула 4.18) та експериментальним рівняється 2,1%.

#### 4.4 Висновки до четвертого розділу

1. Здійснені експерименти підтвердили можливість ефективного використання подрібнених відходів ABS, PLA та TPU пластиків, отриманих в процесі 3D-друку та виготовлення виробів легкої промисловості, як вихідної сировини для шнекового екструдера обладнання тривимірного друку. Обране устаткування, а саме шредер з одним валом та ножами, успішно здійснило подрібнення зазначених полімерних матеріалів до потрібної фракції, яка придатна для їх застосування в якості вихідної сировини для 3D-друку.

2. Проведений ситовий аналіз з використанням набору сит з різними діаметрами отворів на сітці дозволив побудувати криві розподілу подрібнених часток і на основі них отримати регресійні залежності масової долі фракції  $M_{\phi}$  від діаметра подрібнених часток  $d_{\phi}$ .

3. Експериментальні дослідження із визначення насипної густини дали змогу побудувати графіки залежності насипної густини  $\rho_{н.г.}$  від діаметра часток  $d_{\phi}$  подрібнених полімерів і на основі них отримати регресійні рівняння. Вони мають практичне застосування при визначенні тиску  $P_{з.з.}$  в зоні завантаження подрібненого матеріалу з бункера в шнековий екструдер обладнання тривимірного друку. У виведену формулу тиску  $P_{з.з.}$  (2.32) входить насипна густина матеріалу  $\rho_{н.г.}$ , що завантажується з бункера.

4. Отримано регресійні рівняння для пластиків ABS та TPU, що пов'язують залежність об'ємної продуктивності від діаметра подрібнених часток полімеру, частоти обертання шнека та температури плавлення матеріалу.

5. Зробивши аналіз графіків залежності об'ємної продуктивності шнекового екструдера  $Q_{шн.г.}$  від частоти обертання шнека  $n_{шн.}$  та температури нагрівання екструдера  $T_{нагр.}$  при різних розмірах часток полімеру ABS (рис.4.16), встановлено наступне. Збільшення діаметра часток полімеру  $d_{\phi}$  з 1,5

мм до 2,5 мм практично не впливає на об'ємну продуктивність. Вплив частоти не є лінійним, і існує оптимальний її діапазон, за межами якого зростання величини цього параметру не призводить до збільшення продуктивності. Також існує оптимальний діапазон температур, при яких продуктивність досягає максимального значення.

6. Зробивши аналіз графіків залежності об'ємної продуктивності шнекового екструдера  $Q_{\text{шн.е.}}$  від частоти обертання шнека  $n_{\text{шн.}}$  та температури нагрівання екструдера  $T_{\text{нагр.}}$  при різних розмірах часток полімеру TPU (рис.4.19), встановлено наступне. Збільшення діаметра часток полімеру TPU  $d_{\text{ч.}}$  з 1,5 мм до 2,5 мм несуттєво впливає на величину об'ємної продуктивності  $Q_{\text{шн.е.}}$ . Це може вказувати на потребу підвищеної енергії, необхідної для плавлення та переробки більших за діаметром часток. Збільшення діаметра часток  $d_{\text{ч.}}$  потребує для ефективного плавлення матеріалу вищої температури нагрівання  $T_{\text{нагр.}}$ . Збільшення частоти обертання шнека  $n_{\text{шн.}}$  веде до зростання об'ємної продуктивності  $Q_{\text{шн.е.}}$ . Однак існує певна межа, після якої подальше збільшення частоти обертання не приносить значного підвищення величини об'ємної продуктивності. Зростання температури нагрівання  $T_{\text{нагр.}}$  також призводить до збільшення об'ємної продуктивності, але до певного моменту, після подальшого підвищення величини цього параметра стає незначним.

7. Отримана математична модель (2.58) залежності об'ємної продуктивності для ABS пластику від параметрів шнекового екструдера адекватно описує процес екструзії, що було підтверджено проведеними експериментами і може використовуватися для його розрахунку.

## РОЗДІЛ 5.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ ДЕТАЛЕЙ ТА ВИРОБІВ, СТВОРЕНИХ НА ОБЛАДНАННІ ТРИВИМІРНОГО ДРУКУ ДЛЯ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

5.1. Експериментальне дослідження зразків, виготовлених з подрібнених полімерних відходів на обладнанні тривимірного друку зі шнековим екструдером

Аналіз літературних джерел показав, що механічні властивості деталей та виробів, виготовлених за технологією FDM на пристроях тривимірного друку, особливо з використанням шнекового екструдера, визначені недостатньо. Тому потребують проведення більш ґрунтовних експериментальних досліджень [127].

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, другий – розроблений на базі нього 3D-принтер зі шнековим екструдером, що друкує гранулами або подрібненими полімерними відходами [10]. Загальний вигляд пристроїв наведено на рисунку К.1 (додаток К) та рис.3.18, а.

Технічні характеристики 3D-принтера Anycubic Mega S наведено в роботі [10] та в таблиці К.1 (додаток К).

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

Для визначення геометрії тестових зразків використано цифровий електронний штангенциркуль з точністю вимірювання 0,01 мм, що призначений для вимірювання параметрів поверхонь всередині та ззовні, а також глибин отворів (рис.П.1, додаток П).

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 обладнанні тривимірного друку 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; силовимірювальний датчик; лінійний оптичний енкодер; електронна цифрова система; програмне забезпечення. Вона була розроблена на основі розривної машини РТ250М-2, що призначена для дослідження текстильних матеріалів з натуральних і синтетичних волокон на розтяг. 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 рисунку 5.1, а її загальний вигляд – на рисунку 5.2. Основними елементами та вузлами кінематичної схеми машини є: 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–силовимірювальний датчик; 11–лінійний оптичний енкодер; 12–кінцевик. Основними елементами та вузлами розривної машини є: 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–силовимірювальний датчик; 12–лінійний оптичний енкодер; 13–регулятор напруги живлення електричного двигуна; 14–кнопка включення електродвигуна; 15–кнопка зупинки машини.

У розривній машині було встановлено тензOMETричний датчик Tedeа 619 фірми Vishay (рис.5.3). 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 із полімерних композицій або матеріалів, отриманих з рециклінгу [67, 69].

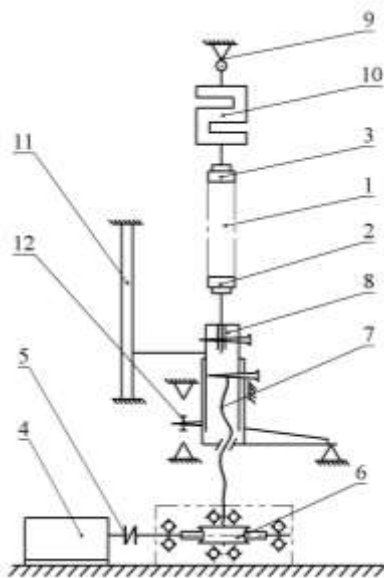


Рисунок 5.1 – Кінематична схема експериментальної установки



Рисунок 5.2 – Загальний вигляд розривної машини:

Використання в розривній машині оптичного лінійного енодера (датчика лінійного переміщення) ASD (Китай) дало змогу підвищити точність вимірювання видовження матеріалів під час випробувань (рис.5.4). 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. Тому використання оптичного лінійного енодера значно поліпшило якість та надійність результатів досліджень, забезпечило високу точність вимірювань, що є особливо важливим при аналізі властивостей нових матеріалів та композитів, створених з використанням 3D-друку. Ще однією перевагою цього датчика є те, що він видає цифровий сигнал 5V DC. Діапазон вимірювання переміщення складає 30 мм.



Рисунок 5.3 – Тензометричний датчик Tede 619 фірми Vishay



Рисунок 5.4 – Оптичний лінійний енкодер ASD

Електронна цифрова система містить аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) HX711 (рис.5.5) та мікроконтролер Arduino Uno R3 (рис.5.6).



Рисунок 5.5 – Аналогово-цифровий перетворювач HX711



Рисунок 5.6 – Мікроконтролер Arduino Uno

Силувимірювальний 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 ці сигнали та передає їх на комп'ютер для обробки та аналізу.

Схема під'єднання датчиків до плати Arduino Uno створена в програмному середовищі Fritzing та представлена на рисунку П.2 (додаток П). 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.П.3, додаток П). Створене програмне забезпечення для експериментальної установки дозволяє отримувати дані з датчиків у режимі реального часу. 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 обладнання тривимірного друку, наведено на рисунку 5.7.

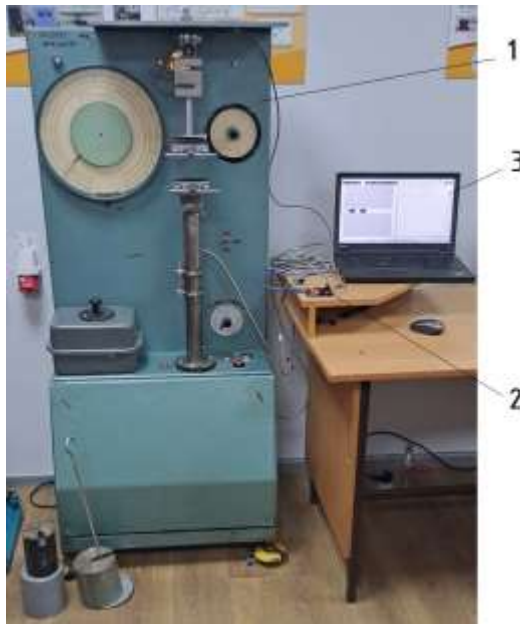


Рисунок 5.7 – Загальний вигляд розробленої експериментальної установки для дослідження зразків: 1 – розривна машина зі встановленими датчиками; 2 – електронно-цифрова система; 3 – комп’ютер зі встановленим програмним забезпеченням

У розривній машині розміщено два кінцевих вимикача 12 (рис.5.1), які обмежують діапазон руху штока 8, задаючи максимальне переміщення на рівні 21 см. Механічну частину розривної машини (рис.5.2) 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.5.2) 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 220 В.

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.5.2) 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. У зубчастому колесі редуктора вмонтована гайка, через яку проходить гвинт 7 (рис.5.1) до якого прикріплено шток 8. Так забезпечується лінійний рух валу. Шток 9 (рис.5.2) рухається донизу. У певний момент часу відбувається розрив зразка. Кнопкою виключення 15 (рис.5.2) машина зупиняється. Дані від тензометричного датчика та оптичного лінійного енкодера під час процесу розриву зразка поступають в електронну цифрову систему, а потім у комп'ютер. За допомогою розробленого програмного забезпечення аналізуються та обробляються. Потім за ними будуються необхідні графіки.

Методи випробування на розтяг стандартизовані. 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.

Для проведення експериментів по визначенню механічних характеристик на розтяг зразки виготовлялися у формі лопатки (рис.5.8) з розмірами поперечного перерізу найтоншої частини  $5 \times 10$  мм (дослідження ABS пластику). Загальний розмір зразка становив  $120 \times 20 \times 5$ . У зв'язку із великим видовженням полімерного матеріалу TPU при розтягу (відносне видовження при розриві для цього пластика складає 510%) та недостатнім ходом штока розривної машини (рис.5.2), що може цей розтяг забезпечити, робочу частину тестової лопатки було зменшено з 35 мм до 20 мм.

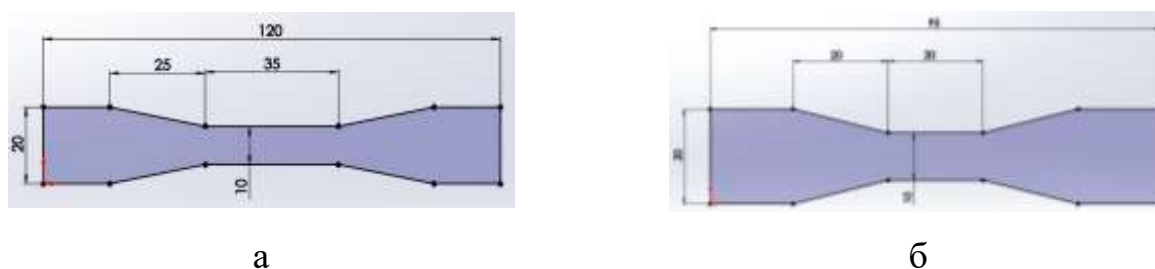


Рисунок 5.8 – Розміри тестової лопатки: *a* – для ABS пластику;  
*б* – для TPU пластику

За допомогою програмного забезпечення SolidWorks були створені комп'ютерні 3D-моделі лопаток для експериментальних досліджень (рис.П.4, додаток П). Пошарова розбивка (G-код) та програма 3D-друку зразка були створені за допомогою програмного забезпечення Cura (рис.П.5, додаток П).

Виготовлення зразків із 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.К.1 (додаток К) та рис.3.18, а).

Параметри 3D-друку для виготовлення тестових лопаток з філаментів ABS та TPU пластиків наведені в таблиці П.1 (додаток П). Параметри 3D-друку для виготовлення тестових лопаток з подрібнених часток ABS та TPU пластиків наведені в таблиці П.2. Для друку в 3D-принтерах використовувалася розроблена конструкція сопла діаметром 0,8 мм. Більш детальна інформація про будову сопла представлена в роботі [45].

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 ступінь заповнення складав 100%.

Загальний вигляд надрукованих лопаток для проведення

експериментальних досліджень на розтяг наведено на рисунках 5.9 та 5.10.



а б в г

Рисунок 5.9 – Тестові лопатки, надруковані з подрібнених часток полімеру ABS з різним заповненням: а – 25%; б – 50%; в – 75%; г – 100%



а б в г

Рисунок 5.10 – 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.5.11).



а

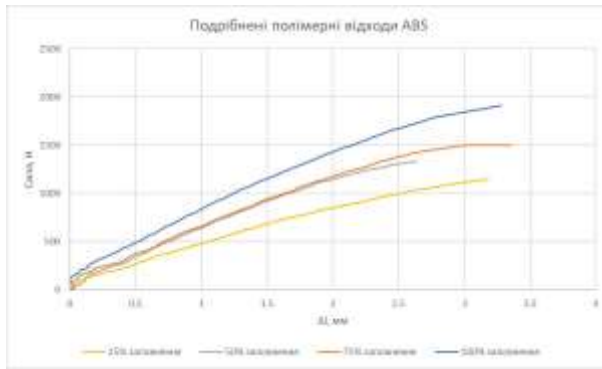


б

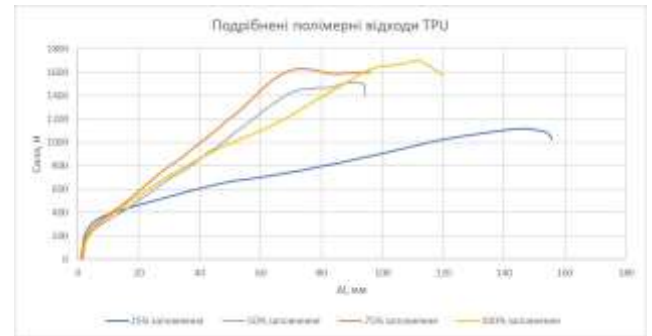


Рисунок 5.11 – Процес одновісного розтягу лопаток: а – ABS пластик; б – TPU пластик

Діаграми руйнувань зразків (лопаток), виготовлених з подрібнених полімерних відходів ABS та TPU з величиною внутрішнього заповнення 25%, 50%, 75% та 100% наведено на рисунку 5.12. Діаграми руйнувань зразків (лопаток), виготовлених з філаменту ABS та TPU з величиною внутрішнього заповнення 25%, 50%, 75% та 100%, представлено на рисунку 5.13. Діаграми руйнувань зразків, виготовлених з полімеру ABS із 100% внутрішнім заповненням наведено на рисунку 5.14.

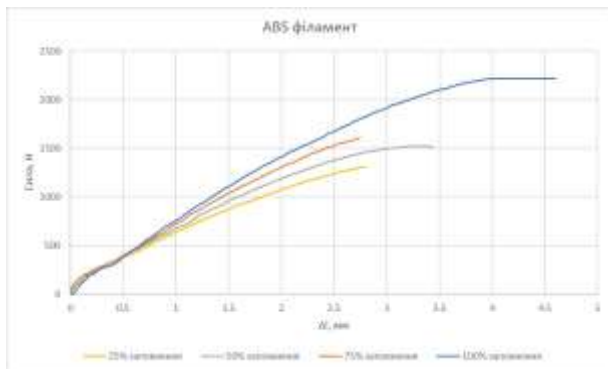


а

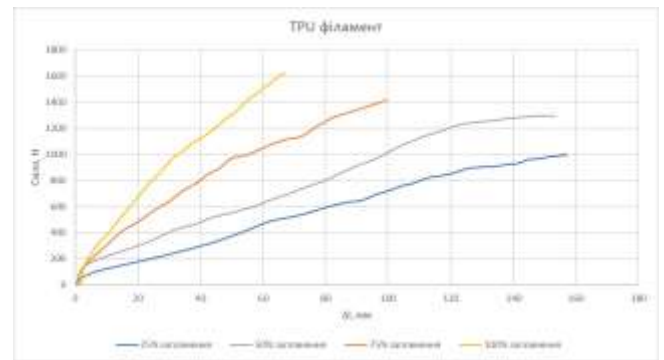


б

Рисунок 5.12 – Діаграми руйнувань зразків, виготовлених з подрібнених полімерних відходів із різною величиною внутрішнього заповнення: *а*–ABS; *б*–TPU



а



б

Рисунок 5.13 – Діаграми руйнувань зразків, виготовлених з філаменту з різною величиною внутрішнього заповнення: *а*–ABS; *б*–TPU

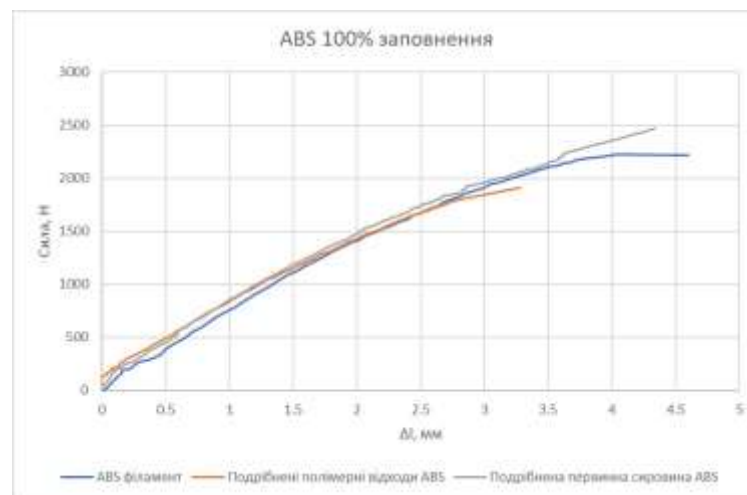


Рисунок 5.14 – Діаграми руйнувань зразків, виготовлених з полімеру ABS із 100% внутрішнім заповненням



Значення механічних характеристик зразків, виготовлених методом 3D-друку з полімерів ABS та TPU з різним внутрішнім заповненням, отримані при випробовуванні на одновісний розтяг наведені в табл.5.1 – 5.5.

Таблиця 5.1

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

Таблиця 5.2

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

Таблиця 5.3

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

Таблиця 5.4

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	1145,50	22,91
2		50	1333,38	26,67
3		75	1502,21	30,04
4		100	1912,95	38,26

Таблиця 5.5

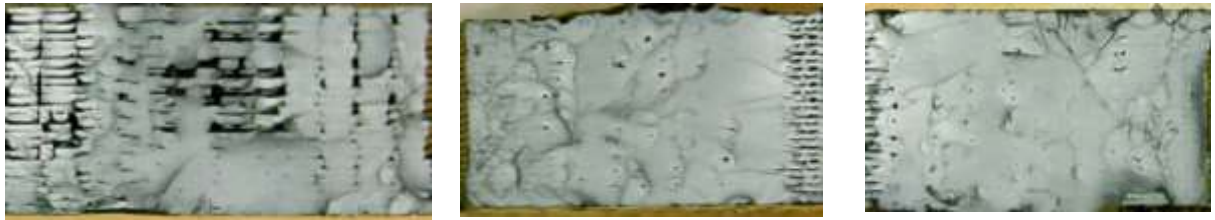
Значення механічних характеристик зразків, виготовлених методом 3D-друку з ABS філаменту при одновісному розтягу

№ п/п	Матеріал	Величина внутрішнього заповнення, %	Максимальна сила, Н	Міцність на розтяг, МПа
1	ABS 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.5.1, показав, що найбільшу міцність на розтяг мають зразки виготовлені на обладнанні тривимірного друку 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 рисунку 5.15.

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 цей зразок має найбільшу міцність на розтяг серед трьох матеріалів.



а

б

в

Рисунок 5.15 – Фото місць розриву лопаток з ABS пластику виготовлених з: а-подрібнених полімерних відходів; б – філаменту; в – подрібненої первинної сировини

Зразки ABS пластику з різним ступенем заповнення після статичного випробування на розтяг наведено на рисунку 5.16 та 5.17, а.



а

б

Рисунок 5.16 – Зразки ABS після статичного випробування на розтяг виготовлені з: а – філаменту; б – подрібнених полімерних відходів

Зразки TPU пластику з різним ступенем заповнення після статичного випробування на розтяг наведено на рисунку 5.17, б.



а



б

Рисунок 5.17 – 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.5.16, 5.17, 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.5.17, б) руйнування дещо інше. 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. 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.К.1, додаток К та рис.3.18, а), мають форму куба з розмірами  $20 \times 20 \times 20$  мм (рис.П.6, додаток П).

Параметри 3D-друку для виготовлення тестових кубиків із філаментів та подрібнених часток ABS та TPU пластиків аналогічні до налаштувань принтера при друку тестових лопаток (табл.П.1 та П.2, додаток П).

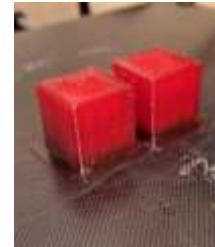
Було надруковано 12 тестових зразків: по три з філаменту ABS та TPU на

3D-принтері Anycubic Mega S та по три з подрібнених часток полімеру на обладнанні тривимірного друку з шнековим екструдером.

Приклад виготовлення зразка із подрібнених полімерних часток TPU на устаткуванні з шнековим екструдером показано на рисунку 5.18.



а



б

Рисунок 5.18 – Процес виготовлення тестового зразка на 3D-принтері, що друкує подрібненими частками пластику TPU: *а* – процес друку тестового зразка; *б* – готовий тестовий зразок

Надруковані зразки наведені на рисунку 5.19.



а



б



в



г

Рисунок 5.19 – Тестові зразки виготовлені методом 3D-друку із полімеру: *а* – TPU (філамент); *б* – TPU (подрібнена частка); *в* – ABS (філамент); *г* – ABS (подрібнена частка)

Надруковані зразки, отримані у вигляді кубика, вимірювалися за допомогою цифрового електронного штангенциркуля (рис.П.1). Розміри куба вимірювалися із усіх сторін у трьох місцях для трьох надрукованих зразків (рис.П.6). Далі визначалося усереднене значення як кінцевий результат. Результати вимірювань заносилися в таблиці П.3 та П.4 (додаток П).

Також був надрукований тестовий кубик (рис.5.20) із подрібнених

відходів (рис.5.21) PET-пляшок (рис.1.16). Через відсутність філаменту з PET пластику друк тестового кубика на звичайному принтері не здійснювався.



Рисунок 5.20 – Тестовий кубик  
(подрібнені частки PET пластику)



Рисунок 5.21 – Подрібнені частки PET  
пластику

При ідеальному калібруванні 3D-принтера відхилення від заданих габаритів тестового кубика повинно бути в межах 0,025 мм. Аналізуючи результати вимірювань з таблиці П.3 та П.4 (додаток П), 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  $\pm 0,5$  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.

Результати вимірювання тестового кубика, надрукованого з PET пластику, показали невелику похибку у друку (табл.П.5, додаток П).

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

Якісний друк на обладнанні тривимірного друку 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 устаткування 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.

Загалом можна відзначити, що розроблений шнековий екструдер для обладнання тривимірного друку має достатню точність та забезпечує високу якість друку. Це устаткування може бути використане для виготовлення готових виробів та деталей різного призначення.

## 5.2. Шляхи використання обладнання тривимірного друку в легкій промисловості

Отримані результати наукових досліджень у вигляді конструкторської документації на обладнання тривимірного друку з шнековим екструдером, що використовує гранули чи подрібнені відходи полімерів впроваджено на швейному підприємстві «Вітнел», взуттєвому підприємстві «КМ-Поділля» та фірмі, що займається торгівлею та сервісом швейного устаткування ТОВ «Спарк-Швейне обладнання».

Підприємство «Вітнел», що спеціалізується на виготовленні швейних виробів, зіткнулося з потребою у модернізації технологічного процесу. Основними викликами були необхідність унікалізації дизайну продукції та

оптимізація використання матеріалів. Впровадження розробленого пристрою тривимірного друку дозволило ефективно вирішити ці завдання. Використання новітнього обладнання забезпечило високу точність та якість виготовлення деталей об'ємного друку, зниження відходів матеріалів та збільшення гнучкості у створенні оригінальних швейних виробів. Економічний ефект від впровадження пристрою проявився у підвищенні продуктивності, зменшенні виробничих витрат та підвищенні конкурентоспроможності продукції на ринку. Інноваційний підхід до процесу виготовлення готової продукції дозволив ПМП «Вітнел» відкрити нові можливості для розвитку та задоволення зростаючих потреб клієнтів. Економічний ефект від впровадження наукових результатів дисертаційної роботи склав 42 тис. грн. Акт впровадження результатів наукових досліджень у виробництво на ПМП «Вітнел» подано в додатку В.

Підприємство «КМ-Поділля», спеціалізуючись на виробництві взуття для бальних танців та військових потреб, стикається з проблемами створення об'ємних полімерних зображень на взутті та утилізації пластикових відходів. Впровадження розробленого обладнання тривимірного друку дозволило ефективно вирішити ці проблеми. Використання такого устаткування не лише полегшило процес нанесення декору на взуття, але й забезпечило можливість переробки пластикових відходів, значно знижуючи витрати на утилізацію. Це не тільки сприяло підвищенню якості та естетики продукції, але й забезпечило значну економію коштів та ресурсів, зменшуючи екологічний вплив виробництва. Економічний ефект від впровадження пристрою проявився в зниженні виробничих витрат на матеріали та утилізацію, підвищенні продуктивності та рентабельності виробництва. Впровадження інноваційного обладнання дозволило підприємству «КМ-Поділля» вийти на новий рівень якості продукції та ефективності процесів, відкриваючи нові можливості для розвитку та зміцнення позицій на ринку. Економічний ефект від впровадження наукових результатів склав 55000 грн. Акт впровадження результатів наукових досліджень у виробництво на ПП «КМ-Поділля» наведено в додатку В.

Використання обладнання тривимірного друку відкрило нові можливості



для підприємства «Спарк-Швейне обладнання», зокрема у сфері швидкого та точного виготовлення замінних деталей для швейного обладнання, що вийшли з ладу. Впроваджене інноваційне рішення значно зменшило час на ремонт та обслуговування устаткування, сприяючи підвищенню рівня задоволеності клієнтів. Використання цього пристрою дозволило ефективно розв'язувати питання несправності обладнання, забезпечуючи швидке вирішення проблем без потреби довготривалого очікування поставок замінних частин. Це не лише зменшило витрати на закупівлю деталей, але й підвищило оперативність обслуговування. Економічний ефект від впровадження пристрою проявився в зменшенні витрат на замінні частини та скороченні простою обладнання, а також в зростанні лояльності та задоволення клієнтів завдяки оперативному обслуговуванню. Впровадження обладнання тривимірного друку стало значним внеском у розвиток інноваційної стратегії підприємства ТОВ «Спарк-Швейне обладнання», відкриваючи нові перспективи для розвитку сервісних послуг. Акт впровадження результатів наукових досліджень у виробничу діяльність на ТОВ «Спарк-Швейне обладнання» подано в додатку В.

Результати дисертаційної роботи використані в навчальному процесі кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету при оновленні курсу лекцій з дисципліни «Сучасні 3D-технології виробництва» для підготовки бакалаврів за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» (освітня програма «Робототехнічні та мехатронні системи галузі») та дисципліни «Сучасні технології та обладнання виробництв галузі» для підготовки магістрів за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» (освітня програма «Галузеве машинобудування»).

Розроблено дві лабораторні роботи з дисципліни «Сучасні 3D-технології виробництва»: «Пристрій тривимірного друку з шнековим екструдером, що використовує гранули чи подрібнені відходи полімерів» та дисципліни «Сучасні технології та обладнання виробництв галузі»: «Дослідження ресурсозберігаючої адитивної технології переробки гранул чи полімерних

відходів з використанням обладнання тривимірного друку з шнековим екструдером». Акт впровадження результатів наукових досліджень у навчальний процес представлено в додатку В.

### 5.3. Практичне використання обладнання тривимірного друку для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості

З метою виготовлення деталей та виробів методом 3D-друку запропонована інноваційна технологія, що містить усі необхідні етапи для запуску виробництва - від підбору і тестування сировини до випробувань надрукованих готових виробів чи деталей легкої промисловості [116].

Виділено 7 основних етапів виготовлення. Етап 1. Дослідження та підбір сировини. На цьому етапі необхідно підібрати і проаналізувати сировину: вихідний матеріал, з якого потім будуть виготовлятися деталі чи вироби легкої промисловості. Етап 2. Друк на принтері: вивчити придатність матеріалу для друку та підібрати його оптимальні налаштування (точність друку, товщина шару, швидкість друку, температура екструдера). Етап 3. Механічні випробування надрукованих зразків із отриманої пробної партії матеріалу – дослідження міцності на розрив, стискання, вигин тощо. Етап 4. Моделювання процесу руйнування зразка деталі. Етап 5. Друк зразка при оптимальних налаштуваннях обладнання тривимірного друку. Етап 6. Механічні випробування надрукованих зразків виробів чи деталей легкої промисловості, отриманих з гранул чи подрібнених відходів полімеру. Етап 7. Виготовлення готових виробів чи деталей легкої промисловості методом FDM-друку на пристрої тривимірного друку з шнековим екструдером.

Розроблене обладнання тривимірного друку з шнековим екструдером, що використовує гранули чи подрібнені відходи полімерів (рис.3.18, а.) [10], знайшло використання в легкій промисловості, зокрема у швейній та взуттєвій галузях, а також у сфері ремонту та сервісу швейного обладнання.

Наведемо декілька конкретних шляхів застосування розробленого

пристрою.

1. Виготовлення складних узорів на тканині, пришивних аплікацій, логотипів, декоративної та функціональної фурнітури (пряжки, застібки, люверси, кнопки, гудзики) для швейних виробів [73]. Приклад нанесення різноманітних декоративних узорів на текстильний матеріал наведено на рисунку 5.22.

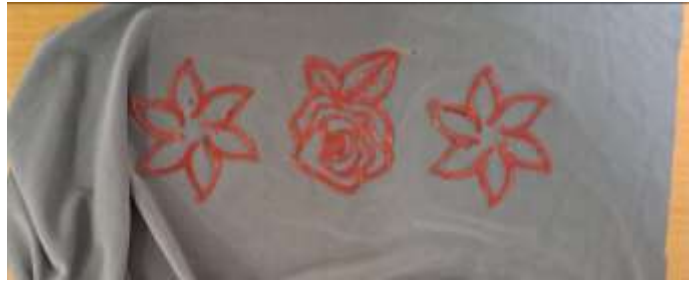


Рисунок 5.22 – Текстильний матеріал з нанесеними декоративними об’ємними полімерними узорами, виготовленими з гранул пластику TPU

Приклад виготовлення деталей на удосконаленому тривимірному друку з шнековим екструдером можна побачити за посиланням: <https://drive.google.com/drive/folders/1CgS9EFYRTC95BRoSq6bXNBss5MYIClg4?usp=sharing>.

На рисунку 5.23 наведено приклад виготовлення логотипів на тканині. Для їх виготовлення використовувалися гранули TPU. На рисунку 5.24 представлено створений об’ємний гербовий знак на фронтальній деталі кашкета (гранули пластику TPU), а рисунку 5.25 – фурнітури (подрібнені відходи ABS).



Рисунок 5.23 – Логотип на тканині (гранули пластику TPU)



Рисунок 5.24 – Об’ємний гербовий знак на фронтальній деталі кашкета (гранули пластику TPU)



Рисунок 5.25 – Пластикова фурнітура (матеріал – подрібнені відходи пластику ABS)

У роботі [104] було проведено дослідження зразків матеріалів із нанесеним об'ємним полімерним покриттям на стійкість до руйнування клиновидним лезом. Отримані результати показали, що після нанесення поверхневого шару полімеру на матеріал за рахунок значної адгезії, що виникає між двома матеріалами в процесі 3D-друку, збільшується стійкість матеріалів до руйнування, підвищується їх міцність та зносостійкість. Це актуально, наприклад, при виготовленні спеціального одягу із деталями, на яких мають бути об'ємні захисні полімерні покриття (рис.5.26).



Рисунок 5.26 – Технічний текстильний матеріал з надрукованим об'ємним полімерним наколінником, виготовленим з гранул пластику TPU

2. Створення індивідуальних елементів для взуття, таких як: декоративні лейби, шільдики, етикетки, пришивні аплікації; ортопедичні устілки; пряжки; підошви, каблуки тощо. Також переробка полімерних відходів може бути використана при створенні корисних компонентів, таких як: елементи упаковки, органайзери для робочих місць, вкладиші для взуття тощо.

Приклад виготовлених об'ємних полімерних декоративних пришивних аплікацій наведено на рисунку 5.27.



Рисунок 5.27 – Об’ємні полімерні декоративні пришивні аплікації для взуття, виготовлені з гранул пластику TPU

На рисунку 5.28 представлено надрукований із подрібнених відходів TPU на обладнанні з шнековим екструдером виріб «взуттєва ортопедична устілка».



Рисунок 5.28 – Виріб «взуттєва ортопедична устілка», надрукований із подрібнених відходів TPU на обладнанні з шнековим екструдером

Для встановлення механічних характеристик взуттєвих виробів, виготовлених методом тривимірного друку, було виготовлено деталь «підощва». Її було піддано серії випробувань, серед основних: стійкість до стирання та багаторазового згину. Дослідження зразка необхідні для встановлення міцності, що є особливо важливим параметром для подальшого його застосування.

З використанням програмного продукту SolidWorks було створено комп’ютерну 3D-модель підощви взуття. Пошарова розбивка (G-код) та програма 3D-друку підощви були створені за допомогою програмного забезпечення Cura (рис.5.29).

З використанням принтерів (рис.К.1, додаток К, рис.3.18) та пластику TPU було надруковано підощви взуття (рис.5.30).

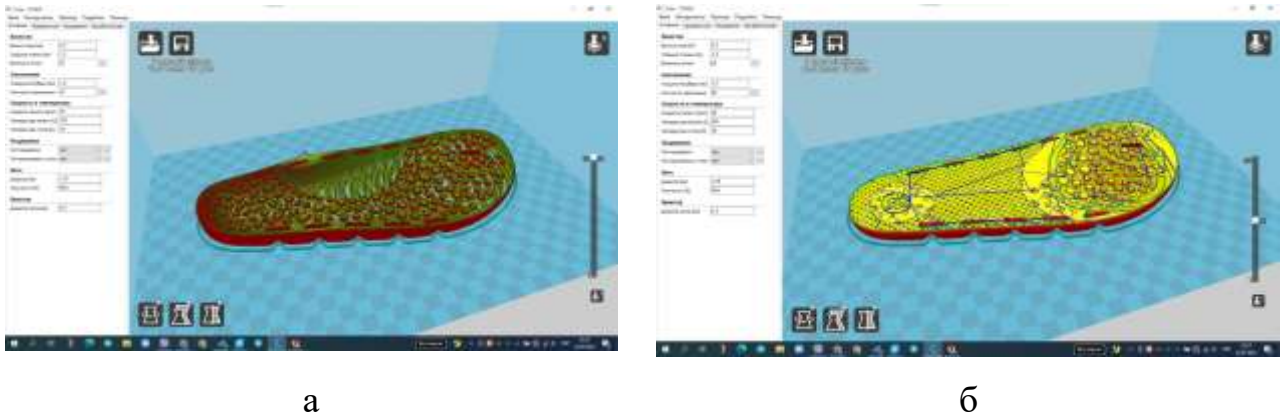


Рисунок 5.29 – Пошарова розбивка підшви взуття: *а* – вид зверху; *б* – вид знизу



Рисунок 5.30 – Підшва взуття виготовлена методом 3D-друку з пластику TPU:  
*а* – філамент; *б* – подрібнені відходи

На етапі 6 було проведено експериментальне дослідження фізико-механічних властивостей підшов, надрукованих методом 3D-друку. З цією метою підшви піддавалися випробуванням на стійкість до багаторазового згину та стійкість до стирання. Дослідження були проведені на спеціалізованому обладнанні кафедри індустрії моди в легкій промисловості Хмельницького національного університету.

Випробування на стійкість до багаторазового згину здійснювалися згідно з методикою, ДСТУ EN ISO 20344 «Методи випробування взуття». Стійкості до

стирання визначали згідно з ISO 4649:2010, метод А (із вертикальною силою 10 Н на відстані стирання 40 мм). Результати досліджень відображені в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6

Результати випробовування надрукованої підошви взуття з філаменту та подрібнених відходів термопластичного поліуретану

Назва показників	Нормуючий документ на метод випробовувань	Значення показників нормуючого документа	Результати випробовувань	
			TPU (філамент)	TPU (подрібнені відходи)
Стійкість до стирання підошов	ISO4649-2014 ДСТУ EN ISO20344	Не більше 0,17 г, не більше 250мм <sup>3</sup>	0,15г (182 мм <sup>3</sup> )	0,13г (168мм <sup>3</sup> )
Стійкість до багаторазового згину підошов	ISO4649-2014 ДСТУ EN ISO20344	Не більше 4мм	Без розростання тріщини	Без розростання тріщини

3. Виготовлення нових або замічних деталей для ремонту та сервісу швейного обладнання, таких як: шестерні, ролики, кріплення тощо. Також методом тривимірного друку можна створювати спеціалізовані інструменти та пристосування для полегшення роботи з швейним обладнанням. Приклад виготовлених шестерень з подрібнених відходів ABS-пластику наведено на рисунку 5.31, а з подрібнених відходів, отриманих з PET-пляшок на рисунку 5.32.



Рисунок 5.31 – Шестерні (відходи ABS пластику)



Рисунок 5.32 – Шестерні (відходи PET-пляшок)

Крім вже згаданих варіантів застосування тривимірного друку в легкій промисловості, існують і інші перспективні способи використання цієї технології. Наприклад, 3D-друк може бути використаний для створення спеціалізованих пристосувань та інструментів, які спрощують виробничий процес, таких як: шаблони для вишивки або розкрою тканини. Важливим напрямом є також створення ергономічних компонентів для одягу та взуття, наприклад, ортопедичних устілок (рис.5.28). Вони розробляються під потреби конкретного споживача індивідуально. Тривимірний друк може бути використаний для виготовлення різноманітних деталей та виробів для військових та цивільного населення [128]. Окрім цього, 3D-друк може бути застосований для експериментів із новітніми матеріалами та технологіями. Це відкриває нові можливості для інновацій у дизайні та виробництві виробів легкої промисловості та інших галузей. Тому він стає важливим інструментом для підвищення інноваційності, гнучкості та ефективності в легкій промисловості та сприяє більш сталому та ефективному використанню ресурсів. Наприклад, подрібнені відходи PET (рис.5.21) можуть бути використані не тільки для виготовлення деталей галузевого машинобудування (рис.5.32), але й для створення предметів інтер'єру.

#### 5.4. Висновки до п'ятого розділу

1. З метою дослідження механічних характеристик зразків, створених за допомогою тривимірного друку, була розроблена експериментальна установка. Вона дає змогу вимірювати зусилля розтягу і видовження зразків, виготовлених з подрібнених полімерних відходів за допомогою обладнання з шнековим екструдером, а також з філаменту з використанням звичайного 3D-принтера. Удосконалення вимірювальної системи розривної машини PT250M-2 за рахунок сучасних вимірювальних систем дозволяє з високою точністю вимірювати механічні властивості матеріалів, що досліджуються.

2. Для проведення експериментів із визначення механічних



характеристик на розтяг, зразки були виготовлені у вигляді лопатки відповідно до існуючих стандартів. Це дозволило точно визначити міцність надрукованих зразків та сприяло забезпеченню сталих результатів експерименту, що є важливим для аналізу механічних властивостей деталей та виробів, створених за допомогою 3D-технологій.

3. Аналіз отриманих даних після розриву зразків, виготовлених з різних матеріалів, виявив перевагу використання у шнекових екструдерах в якості вихідної сировини подрібнених первинних гранул ABS пластику з точки зору міцності на розтяг. Зразки з філаменту показали на 11% меншу міцність порівняно з першим матеріалом, тоді як вироби з вторинної сировини (подрібнені полімерні відходи) продемонстрували найнижчі показники міцності, зі зменшенням на 29%. Наведені результати вказують на значний вплив типу сировини на механічні характеристики готових деталей та виробів, підкреслюючи при цьому важливість вибору оптимального матеріалу для конкретних застосувань.

4. Аналіз руйнування зразків з ABS та TPU пластиків після розриву показав, що зразки з ABS в більшості випадків розривались однорідно біля горловини лопатки, тоді як зразки з TPU демонстрували різноманітні форми розриву, включаючи втрату фрагментів. Ці відмінності вказують на важливість вибору матеріалу для виготовлення деталей та виробів.

5. Встановлено, що обладнання з шнековим екструдером має достатню точність і забезпечує високу якість друку та може бути застосоване для виготовлення продукції в різних галузях.

6. Розроблено рекомендації та виготовлено експериментально-промислові зразки обладнання тривимірного друку, які впроваджено на підприємствах легкої промисловості.

7. Виготовлені деталі та вироби і отримані результати експериментальних досліджень підтвердили можливість використання удосконаленого обладнання тривимірного друку з шнековим екструдером в легкій промисловості та галузевому машинобудуванні.

## ВИСНОВКИ

1. Удосконалено узагальнену класифікацію 3D-принтерів за рахунок їх поділу за методом екструзії полімерного матеріалу. Це дало змогу вибрати екструзію на основі шнека для подальшої розробки шнекового екструдера обладнання тривимірного друку з FDM технологією для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості.

2. Встановлено, що обладнання тривимірного друку із визначеними в узагальненій класифікації екструзійними системами подачі матеріалу широко впроваджується в різні сфери виробництва та застосовується для виготовлення готової продукції і може бути використано для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості з полімерних і композиційних матеріалів.

3. Розроблено метод розрахунку основних параметрів шнекового екструдера в зоні живлення, що дозволило отримати залежності, які пов'язують об'ємну продуктивність та тиск на цій ділянці з основними геометричними параметрами завантажувального бункера та шнека, а також частотою його обертання і властивостями подрібненого полімерного матеріалу (насипною густиною).

4. Розроблено метод розрахунку основних параметрів шнекового екструдера в зоні дозування, що дозволило отримати залежності, які пов'язують об'ємну продуктивність та тиск на цій ділянці з основними геометричними параметрами шнека, а також частотою його обертання. Встановлено, що ступінь стиснення полімерних матеріалів в зоні стиснення шнеку є одним з основних параметрів для розрахунку його геометричних характеристик та визначено його діапазон, який знаходиться в межах від 1,75:1 до 4,5:1. Встановлено, що від коефіцієнта стиснення залежить геометрія шнека та ефективність переробки пластику.

5. Розраховано загальну потужність приводу шнекового екструдера обладнання тривимірного друку виходячи із отриманих величин потужностей в

зонах живлення та дозування, що дало змогу вибрати оптимальний кроковий двигун з планетарним редуктором.

6. Розроблено конструкції екструзійних насадок для використання в шнекових екструдерах обладнання тривимірного друку. Для екструдерів із шнеком до 10 мм запропоновано використати стандартні сопла, але зі зміненою внутрішньою будовою, що включає конічний канал та додаткову камеру. Це запобігло неконтрольованому витіканню розплавленого полімеру. Для шнеків понад 10 мм розроблено формуючу насадку з дорном та збільшеним вихідним отвором, що дозволило підвищити продуктивність екструдера для виготовлення великогабаритних деталей. Наявність у ній перфорованої перегородки забезпечило орієнтацією макромолекул вздовж течії полімеру та підвищило міцність надрукованих деталей та виробів. Отримано аналітичні залежності для визначення загального коефіцієнту опору розроблених екструзійних насадок.

7. Розроблено з використанням програмного середовища SolidWorks шнековий екструдер, здійснено його виготовлення та проведено його встановлення в 3D-принтері з технологією друку FDM. Це дало змогу адаптувати устаткування для роботи з гранулами та подрібненими полімерними відходами. Експериментальні дослідження підтвердили працездатність обладнання та якісний друк експериментальних зразків та деталей.

8. Розроблено нову систему охолодження шнекового екструдера з використанням: охолоджуючих ребер на корпусі; теплового бар'єру між завантажувальним бункером та матеріальним циліндром; вентиляторів для обдуву потоком повітря ребер та полімерного матеріалу всередині бункера. Проведено теоретичні та експериментальні дослідження системи охолодження шнекового екструдера з метою визначення температури в критичних місцях з використанням SolidWorks Simulation та вимірювального устаткування. Встановлено, що застосування розробленої системи дозволило знизити температуру в місці завантаження матеріалу на 39 °C. Виявлено, що флубон 15 є найкращим матеріалом в якості теплового бар'єру. Встановлено, що

запропонована система охолодження значно покращує безперервність подачі матеріалу в шнековий екструдер.

9. Встановлено, що оптимальним способом для переробки полімерних відходів є механічне руйнування. Це дало змогу в якості обладнання для подрібнення відходів ABS, PLA і TPU пластиків вибрати шредер з одним валом та з його використанням отримати фракції часток від 0,5 мм до 2,5 мм для їх подальшого використання у шнековому екструдері в якості вихідної сировини. Здійснено ситовий аналіз, який дозволив визначити масову долю фракцій у загальній масі подрібненого матеріалу, насипну густину подрібнених часток та на основі отриманих даних побудувати регресійні рівняння, величини яких є вихідними для розрахунку тиску в зоні живлення екструдера.

10. Проведено експериментальні дослідження по визначенню об'ємної продуктивності  $Q_{\text{шт.е.}}$  для ABS та TPU пластиків. На основі методології планування експерименту за допомогою некомпозиційних планів другого порядку отримано регресійні рівняння, що пов'язують об'ємну продуктивність з діаметром подрібнених часток полімеру  $d_{\text{ч.}}$ , частотою обертання шнека  $n_{\text{шт.}}$  та температурою нагрівання екструдера  $T_{\text{нагр.}}$ .

11. Проведено експериментальні дослідження фізико-механічних характеристик зразків, виготовлених з філаменту, подрібнених первинної сировини та відходів ABS пластику на обладнанні тривимірного друку зі шнековим екструдером з використанням розривної машини. Аналіз отриманих даних показав, що найвищі показники міцності спостерігаються у зразків, виготовлених з первинної подрібненої сировини ABS. В порівнянні з ними, зразки, виготовлені з філаменту ABS, демонструють зниження міцності на 11%. Найменшу міцність на розтяг мають зразки, надруковані з вторинної сировини, тобто з подрібнених відходів, де міцність знижується на 29% у порівнянні з первинною сировиною. Знаючи міцність трьох видів матеріалів, можна обрати вихідну полімерну сировину для конкретного практичного застосування. Надруковані та виміряні зразки у вигляді тестового кубика показали, що точність

друку на обладнанні з шнековим екструдером знаходиться в межах допуску 0,025 мм.

12. Розроблено рекомендації та виготовлено експериментально-промислові зразки обладнання тривимірного друку, які впроваджено на підприємствах ПМП «Вітнел» (м. Хмельницький), ПП «КМ-Поділля» (м. Хмельницький) та ТОВ «Спарк-Швейне обладнання». Застосування зазначеного устаткування дало змогу оновити матеріально-технічну базу, вирішити питання створення об'ємних полімерних зображень на одязі та взутті, утилізації пластикових відходів та виготовлення замінних деталей для швейного обладнання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Леховіцер В.О. Особливості розвитку машинобудівної галузі в сучасних умовах. *Ефективна економіка*. 2016. № 5.
2. Іщук С.О. Розвиток машинобудування в Україні: проблеми та шляхи їх вирішення : монографія. Львів: ДУ «Інститут регіональних досліджень імені М.І. Долишнього НАН України», 2022. 137 с.
3. Smerichevskyi, S.F., Kryvoviazziuk, I.V., Raicheva, L.I. & Smerichevska, S.V. Research on the development of the machine-building industry of Ukraine: state and prospects : multi-authored monograph. Latvia : Izdevnieciba «Baltija Publishing», 2017. 200 p.
4. Гурин В.А., Востріков В.П., Кузьмич Л.В. Основи промислових технологій і матеріалознавства : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2019. 310 с.
5. Тебенко В.М. Економіка та організація інноваційної діяльності : навч. посіб. 1 вид. Вид-во : Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2014. 302 с.
6. Paulo Davim J. Modern machining technology. A practical guide. Woodhead Publishing Limited, 2011. 242 p.
7. Пупань Л.І. Постпроцеси адитивних технологій : навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання. Харків : НТУ «ХП», 2023. 91 с.
8. Туташинський В.І. Технології сучасного виробництва : навчальний посібник. К.: Конві Прінт, 2021. 155 с. – URL: <https://undip.org.ua/library/tekhnolohii-suchasnoho-vyrobnytstva-navchalnyy-posibnyk/>.
9. Цибуленко В.О., Пасічник В.А., Воронцов Б.С. Перспективи використання гібридного адитивно-субтрактивного виробництва. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2022. № 1. С. 34-41.
10. 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.

11. Андрощук Г.О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (I частина). *Наука, технології, інновації*. 2017. № 1. С. 68-77.

12. Манжілевський О.Д., Іскович-Лотоцький Р.Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2021. 105 с.

13. Поліщук А., Скиба М. 3D-принтер для друку гранулами та подрібненими відходами полімерних матеріалів. *Сучасні тенденції розвитку інженерії, технологій та транспорту* : зб. тез доп. Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, 18-19 жовтня 2022 р. Хмельницький : ХНУ, 2022. С. 367-370.

14. Polishchuk O., Skyba M., Polishchuk A., Lisevich S., Zozulia P., Voitsekhov D. Engineering calculations of strength of the details made by 3D-printing method. *Технічна творчість* : зб. наук. праць. Хмельницький : ХНУ, 2021. № 4. С. 33-34.

15. Поліщук О.С., Скиба М.Є., Поліщук А.О., Лісевич С.П. Перспективи створення обладнання для виготовлення монофіламенту для 3D-друку. *Ресурсозберігаючі технології та обладнання* : зб. тез доп. XX Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених, 28-29 квітня 2021 р. К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2021. С. 119-122.

16. Zozulia P., Pyshcheniuk N., Skyba M., Polishchuk O., Malec M. General classification of 3D printing. *Actual problems of modern science*. Monograph : edited by Musial J., Polishchuk O., Sorokatji R. 2017. pp. 413-421.

17. Зозуля П.Ф., Поліщук О.С., Поліщук А.О. Перспективи застосування 3D-друку в легкій промисловості. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2017. №4. С. 102-104.

18. Поліщук А.О., Скиба М.Є., Поліщук О.С., Лісевич С.П. Робот-маніпулятор з функцією 3D-друку для виконання операцій легкої промисловості. *Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку* : матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції, 29-30

жовтня 2020 р. Луцьк : Луцький НТУ, 2020. С. 71-72.

19. Polishchuk A., Skyba M., Polishchuk O., Mitsa V. 3D printing in the manufacture of sewing products. *Українсько-Польські наукові діалоги* : зб. тез доп. IX Міжнародної конференції «Українсько-польські наукові діалоги», 20-23 жовтня 2021 р. Хмельницький : ХНУ, 2021. С. 112-114.

20. 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.

21. Кінематика 3D-принтерів. Види та особливості. URL: <https://www.3dprinter.ua/kinematyka-3d-prynteriv-vydy-ta-osoblyvosti-robymo-svij-vybir/>. (дата звернення 23.07.2023).

22. Поліщук О.С., Поліщук А.О., Пундик С.І. Виготовлення 3D принтера для навчального процесу. *Технічна творчість* : зб. наук. праць. Хмельницький : ХНУ, 2016. № 1. С. 52-55.

23. Krishnanand; Soni, S., Nayak, A. & Taufik M. (2022). Development of graphics user interface (GUI) for process planning in extrusion based additive manufacturing. *Materials Today Proceedings*, 49, 2, pp. 403-411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.306>.

24. Gonzalez-Gutierrez, J. , Cano, S., Schuschnigg S., Kukla C., Sapkota J. & Holzer C. (2018). Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives. *Materials*, 11(5), 840. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11050840>.

25. Suwanpreecha, C. & Manonukul, A. (2022). A Review on Material Extrusion Additive Manufacturing of Metal and How It Compares with Metal Injection Moulding. *Metals*, 12(3), 429. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12030429>.

26. Поліщук О. С., Зозуля П. Ф., Поліщук А. О. Узагальнена класифікація філаментів для 3D-друку. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2017. № 6. С. 51–59.

27. Спеціалізована БД «Винаходи (корисні моделі) в Україні». URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=search>. (дата звернення



15.09.2023).

28. Patent Public Search Basic (PPUBS Basic). URL: <https://ppubs.uspto.gov/pubwebapp/static/pages/ppubsbasic.html>. (дата звернення 16.09.2023).

29. PATENTSCOPE. URL: <http://surl.li/qiocc>. (дата звернення 16.09.2023).

30. Espacenet. Patent search. URL: <http://surl.li/qiocl>. (дата звернення 17.09.2023).

31. Start Your Search. URL: <https://www.lens.org/>. (дата звернення 17.09.2023).

32. Google Patents. URL: <http://surl.li/pcfoq>. (дата звернення 18.09.2023).

33. A 3D printer screw extruder that prints granules or crushed particles of polymer. URL: <http://surl.li/pcfoq>. (дата звернення 18.09.2023).

34. Jo, J., Jo, B., Cho, W. & Kim, J-H. (2020). Development of a 3D Printer for Concrete Structures: Laboratory Testing of Cementitious Materials. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, March. 14, 13. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0388-2>.

35. Hu, F., Mikolajczyk, T., Pimenov, D. & Gupta M.K. (2021). Extrusion-Based 3D Printing of Ceramic Pastes: Mathematical Modeling and In Situ Shaping Retention Approach. *Materials*, 14(5), 1137. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14051137>.

36. Lin, T., Zhao, Z., Wang, T. & Pan, Y-T. (2023). Three-Dimensional Printing of Large Ceramic Products and Process Simulation. *Materials*, 16(10), 3815. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16103815>.

37. Boniatti, J., Januskaite, P., Fonseca, L.B., Viçosa, A.L., Amendoeira, F.C., Tuleu, C., Basit, A.W., Goyanes, A. & Ré, M-I. (2021). Direct Powder Extrusion 3D Printing of Praziquantel to Overcome Neglected Disease Formulation Challenges in Paediatric Populations. *Pharmaceutics*, 13(8), 1114. DOI: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13081114>.

38. Tian, J., Zhang, R., Yang, J., Chou, W., Xue, P. & Yun Ding. (2021). Additive Manufacturing of Wood Flour/PHA Composites Usin Micro-Screw

Extrusion: Effect of Device and Process Parameter on Performance. *Polymers*, 13(7), 1107. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13071107>.

39. Tian, J., Zhang, R., Wu, Y. & Xue, P. (2021). Additive manufacturing of wood flour/polyhydroxyalkanoates (PHA) fully bio-based composites based on micro-screw extrusion system. *Materials & Design*, 199, 109418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109418>.

40. Екструдер гранул COGIT AM. URL: [https://en.cogit.am/advanced\\_pellet\\_extruder/](https://en.cogit.am/advanced_pellet_extruder/). (дата звернення 10.10.2023).

41. Sikora J. Design of Extrusion Heads. Lublin University of Technology, 2020. 64 p. – URL: <http://surl.li/mageh>.

42. Сокольський О.Л. Проектування формуючих пристроїв обладнання для переробки пластмас : навч. посіб. К. : НТУУ «КПІ», 2014. 148 с.

43. Коваленко К.Г., Сокольський О.Л., Сівецький В.І. Екструзійне формування полімерних погонажних виробів з урахуванням в'язкопружних властивостей : монографія. К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 108 с.

44. Printer mods. 3D Printer Nozzle Guide: All You Need to Know. URL: <https://printermods.co.uk/blogs/news/3d-printer-nozzle-guide-all-you-need-to-know>. (дата звернення 07.08.2023).

45. Полішук 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.

46. 3D printer improvements. URL: <http://www.tridimake.com/2016/06/3d-printing-nozzles-characteristics.html>. (дата звернення 07.08.2023).

47. МікроАмпер. Сопла. URL: <http://surl.li/lzhxj>. (дата звернення 29.09.2023).

48. 3D Reams. Сопло Volcano. URL: <http://surl.li/lziqx>. (дата звернення 29.09.2023).

49. E3D. SuperVolcano Nozzles. URL: <https://e3d-online.com/products/supervolcano-nozzles>. (дата звернення 29.09.2023).

50. Diyshop. Сопло з подовженим наконечником з нержавіючої сталі 3D принтера. URL: <http://surl.li/lzitz>. (дата звернення 30.09.2023).

51. V6 CHT Clone Tri Flow Nozzle. URL: <https://www.ebay.com/itm/185809769234>. (дата звернення 3.10.2023).

52. 3djake. 3D Printer Nozzle Guide. URL: <https://www.3djake.com/info/guide/3d-printer-nozzle-guide>. (дата звернення 03.10.2023).

53. All3dp. Best 3D Printer Nozzle: Types, Sizes & Materials. URL: <https://all3dp.com/2/3d-printer-nozzle-size-material-what-to-know-which-to-buy/>. (дата звернення 03.10.2023).

54. A7lab. Сопло TUNGSTEN від Phaetus® з карбід вольфраму. URL: <https://www.a7lab.in.ua/home/extruders-and-hotends/phaetus-tungsten/>. (дата звернення 04.10.2023).

55. Guide to 3D Printing Materials: Types, Applications, and Properties. URL: <https://formlabs.com/asia/blog/3d-printing-materials/>. (дата звернення 04.10.2023).

56. Materials Used in 3D Printing: Guide to 3D Printing Materials. URL: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/3d-printing-materials/>. (дата звернення 16.10.2023).

57. MonoFilament. Стандартні матеріали. URL: <https://monofilament.com.ua/ua/products/standartnye-materialy/>. (дата звернення 06.07.2023).

58. MonoFilament. Інженерні матеріали. URL: <https://monofilament.com.ua/ua/products/inzhinernye-plastiki/>. (дата звернення 07.07.2023).

59. Основи 3D-друку. Електронний посібник. URL: [https://cpto.dp.ua/public\\_html/posibnyky/osnovy\\_3d.pdf](https://cpto.dp.ua/public_html/posibnyky/osnovy_3d.pdf). (дата звернення 05.04.2023).

60. Prusa J. 3D printing handbook. Praga: Prusa Research, 2023. 67 p.

61. Юскаєв В.Б. Композиційні матеріали : навч. посіб. Суми : Видавництво СумДУ, 2006. 199 с.

62. Джурка Г.Ф. Полімерні композиційні матеріали. Полтава, 2008. 58 с. URL: <http://dspace.pnpu.edu.ua/bitstream/123456789/3306/1/Dgurka.pdf>.
63. Копань В.С. Композиційні матеріали. К. : Унів. вид-во «Пульсари», 2004. 200 с. URL: [http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2021/Kopan\\_2004\\_200.pdf](http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2021/Kopan_2004_200.pdf).
64. Гончаренко В.В., Коваленко І.В. Технологія композиційних матеріалів : навч. посіб. К., 2007. 131 с. URL: [https://cpsm.kpi.ua/nauka/knigi/Gon\\_Kov\\_TehnKompMater-2007.pdf](https://cpsm.kpi.ua/nauka/knigi/Gon_Kov_TehnKompMater-2007.pdf).
65. Суберляк О.В., Баштаник П.В. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів : підруч. для студ. ВНЗ. Вид. 2-е, допов. Львів : Растр-7, 2015. 454 с.
66. Курта С.А. Наповнювачі – синтез, властивості та використання : навч. посіб. Івано-Франківськ : Видавництво Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2012. 302 с. URL: <https://kc.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/11/2021/02/chemistry-of-fillers-and-pigments.pdf>.
67. 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. 252-262.
68. Polishchuk A., Polishchuk O., Rubanka M. Development of 3D printing equipment using a mixture of polymer material and metal powder. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2023)* : зб. тез доп. XIII Міжнародної науково-практичної конференції, 25–26 травня 2023 р. Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. Т. 1. С. 204-205.
69. 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.
70. Polishchuk O., Bonek M., Polishchuk A., Lisevich S., Grudinin V., Matiukh S. Manufacturing of products and parts by 3D printing from composite threads containing metals. *The International Student Scientific Conference*

*TalentDetector2023\_Winter* : Prace Katedry Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych. Gliwice : Politechnika Śląska. 2023. pp. 431-446.

71. TPU. URL: <http://surl.li/plivf>. (дата звернення 04.01.2023).

72. MonoFilament. Elastan D100 червоний. URL: <http://surl.li/njhua>. (дата звернення 14.10.2023).

73. Поліщук А. Нанесення об'ємних зображень на деталі одягу та взуття з використанням 3D-друку. *Ресурсозберігаючі технології легкої, текстильної і харчової промисловості* : зб. тез доп. Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції молодих вчених та студентів, 22 листопада 2023 р. Хмельницький : ХНУ, 2023. С. 178-179.

74. Polishchuk A.O., Skyba M.Ye., Tanski T., Polishchuk O.S. Prospects of recycling polyethylene terephthalate waste into consumables for 3D printers. *Мехатронні системи: інновації та інжиніринг*: зб. тез доп. V Міжнародної науково-практичної конференції, 4 листопада 2021р. Київ : КНУТД, 2021. С. 92-93.

75. Polishchuk A., Polishchuk O., Skyba M., Matiukh S., Tański T., Bonek M. Development of technologies and equipment for recycling polyethylene terephthalate waste into consumables and finished product. *The International Student Scientific Conference TalentDetector2023\_Winter* : Prace Katedry Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych. Gliwice : Politechnika Śląska. 2023. pp. 415-430.

76. Polishchuk A.O., Polishchuk O.S., Rubanka M.M. Prospects of use of «rPET» material in quality of raw materials for 3D printing. *Мехатронні системи: інновації та інжиніринг* : зб. тез доп. VI Міжнародної науково-практичної конференції. Київ : КНУТД, 2022. С. 59.

77. Місяць В.П. Розвиток наукових основ проектування обладнання для подрібнення відходів термопластичних і гумових матеріалів легкої промисловості : дис... д-ра техн. наук : 05.05.10. Київ, 2008. 365 с.

78. Місяць В.П. Моделювання процесу різання гум і термопластичних матеріалів між двома ножами в роторних дробарках. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2007. № 5. С. 145-149.

79. Місяць В.П., Бурмістенков О.П., Гладчук О.З. Моделювання процесів

руйнування полімерних матеріалів при подрібненні. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2007. №3. С. 40-45.

80. Рубанка М.М., Місяць В.П. Відходи легкої промисловості, способи переробки та області подальшого використання. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія «Технічні науки»*. 2015. №4 (88). С. 34-39.

81. Мікульонок І.О., Карвацький А.Я., Лелека С.В., Іваненко О.І. Валкові дробарки і млини (Огляд конструкцій). *Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2022. №1. С. 30-43.

82. Скиба М.Є. Наукові основи ресурсозберігаючих технологій переробки відходів натуральних шкір у матеріали та вироби взуттєвого виробництва: дис... д-ра техн. наук : 05.19.06. Київ, 2004. 418 с.

83. Скиба М.Є. Обладнання для переробки відходів. Хмельницький : ПП Ковальський В.В., 2004. 124 с.

84. Скиба М.С., Михайловський Ю.Б., Золотенко Е.О. Методика розрахунку технологічних та конструктивних параметрів молоткового подрібнювального обладнання. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2008. №2. С. 41-45.

85. Скиба М.Є., Михайловський Ю.Б., Золотенко Е.О. Моделювання процесу руйнування текстильного матеріалу в молоткових подрібнювачах. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2006. № 5. С. 30-34.

86. Скиба М.Є., Михайловський Ю.Б., Головка Г.С. Моделювання процесу подрібнення композиційних матеріалів з використанням методу скінченних елементів. *Вісник Технологічного університету Поділля*. 2003. №6. С. 7-11.

87. Михайловський Ю.Б., Золотенко Е.О. Визначення факторів які суттєво впливають на ефективність проектування молоткового подрібнювача текстильних матеріалів. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2010. №5. С. 76-80.

88. Заяць В.В., Михайловський Ю.Б. Визначення оптимальних параметрів основних характеристик подрібнення полімерів у роторних дискових подрібнювачах. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2011. № 2/3 (50). С. 50-53.

89. Zhao, L-M., Chen, L-J., Su, M., He, F., Zhang, D-B. & Luo, Y. (2013). Modeling and simulation on crushing process of impact crusher. *Journal of the China Coal Society*. 38, 8. pp. 1496-1502(7). URL: <https://www.ingentaconnect.com/content/jccs/jccs/2013/00000038/00000008/art00032>.

90. Duan, G., Shi, B. & Gu, J. (2021). Research of Single-Particle Compression Ratio and Prediction of Crushed Products and Wear on the 6-DOF Robotic Crusher. *Mathematical Problems in Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6634272>.

91. Ciężkowski P., Maciejewski J., Bąk S. Experimental studies on the efficiency of the crushing processes. Publisher : LAP Lambert Academic Publishing, 2018. 84 p. ISBN: 978-613-9-84936-9.

92. Hong, S., Han, U.C., Kim, G.C., Ri, K.M. & Ri, S. (2023). Numerical Simulation of the Collision Breakage Process between the Agglomerate and Hammer in a Hammer Crusher Using DEM. *Shock and Vibration*. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/2838179>.

93. Gang, D., Xiumin, F. & Dongming, H. (2009). Analysis and optimization of cone crusher performance. *Minerals Engineering*. 22, 12. pp. 1091-1093. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.03.020>.

94. Xing, Y., Sun, D., Zhang, M. & Shu, G. (2023). Crushing Responses of Expanded Polypropylene Foam. *Polymers*. 15(9). 2059. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15092059>.

95. Muiyiwa Okusanya M., Gbenga I. Design and Development of Plastic Crusher for a More Efficient Waste Management Practice. *International Journal of Innovative Research and Development*. Volume 9. Issue 8. August 2020. <https://doi.org/10.24940/ijird/2020/v9/i8/AUG20075>.

96. Polishchuk A., Polishchuk O., Skyba M., Lisevych S., Bonek M., Pervak

A. Polymeric materials for manufacture of light industry products and their physical and mechanical properties. *The International Student Scientific Conference TalentDetector2022\_Summer* : Prace Katedry Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych. Gliwice : Politechnika Śląska. 2022. pp. 384-393.

97. Поліщук А.О., Скиба М.Є., Лісевич С.П., Ткачук О.Л. Переробка відходів полімерних матеріалів легкої промисловості у готові вироби з використанням адитивних технологій. *Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування* : зб. тез мат. VIII Міжнародної науково-практичної конференції 25-28 травня 2021 р. Луцьк. С. 68-69.

98. Polishchuk A., Polishchuk O., Bonek M., Brytan Z., Lisevich S. Development of technology for processing of polymer waste of light industry into finished products using 3D printers. *The International Student Scientific Conference TalentDetector2023\_Summer* : Prace Katedry Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych. Gliwice : Politechnika Śląska. 2023. pp. 548-557.

99. Поліщук А.О., Скиба М.Є., Поліщук О.С. Перспективи розробки обладнання для подрібнення відходів 3D-друку. *системи : інновації та інжиніринг* : зб. тез доп. VII Міжнародної науково-практичної конференції. Київ : КНУТД, 2023. С. 115-116.

100. Поліщук А.О. Експериментальне дослідження подрібнених полімерних відходів, що використовуються в якості вихідної сировини шнекового екструдера 3D-принтера. *Наукові нотатки. Луцький національний університет*. 2023. Випуск №76. С. 134-146.

101. Polishchuk A.O., Skyba M.Ye., Polishchuk O.S. Equipment for processing pet bottles into raw materials for the screw extruder of the 3D printer. *Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування* : матеріали VI Всеукр. наук.-практ. Інтернет-конференції. Полтава : ПДАУ, 2023. С. 142-145.

102. Polishchuk A.O., Polishchuk O.S., Skyba M.Ye., Lisevich S.P. Development of technology for processing polymer waste into finished products by



3D printing. *Перспективи розвитку машинобудування та транспорту* : зб. тез доп. III-ї Міжнародної науково-технічної конференції. Вінниця : ВНТУ, 2023. С. 457-459.

103. Polishchuk A., Skyba M., Polishchuk O., Lisevich S. Shredding of polymer waste of light industry. *Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування* : зб. тез доп. IX Міжнародної науково–практичної конференції. Луцьк : Вежа-Друк, 2023. С. 55-56.

104. Polishchuk, O., Zozulia, P., Polishchuk, A., Maidan, P., Skyba, M., Kostyuk, N., Kravchuk, A. & Kravchuk, O. (2020). Development and research of equipment for processing of granulated polymeric materials via 3d printing for the needs of light industry. *Fibres and Textiles*. 27(4). pp. 75-80. URL: [http://vat.ft.tul.cz/2020/4/VaT\\_2020\\_4\\_10.pdf](http://vat.ft.tul.cz/2020/4/VaT_2020_4_10.pdf).

105. Редько Р.Г., Редько О.І., Зубовецька Н.Т., Кокоша Т.М. Використання сучасних 3D–принтерів для підвищення якості виробництва продукції. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк, 2015. Випуск № 52. С. 122-125.

106. Орел В.М., Щетинін В.Т., Ченчева О.О., Павлюченко А.П., Саленко О.Ф. Про доцільність використання засобів 3d друку для підвищення точності статичних і динамічних досліджень важільно-обертових механізмів. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2015. Випуск 1(90). Частина 2. С. 111-117.

107. Поліщук О.С., Поліщук А.О., Пундик С.І. Розробка 3D принтера для навчального процесу. *Технічна творчість: Збірник наукових праць*. Хмельницький: ХНУ, 2016. № 1. С. 52-55.

108. Kristiawan, R.B., Imaduddin, F., Ariawan, D., Ubaidillah & Arifin, Z. (2021). A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*. 11(1). pp. 639–649. DOI: <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0063>.

109. Narang, R. & Chhabra, D. (2017). Analysis of Process Parameters of Fused Deposition Modeling (FDM) Technique. *International Journal on Future*

*Revolution in Computer Science & Communication Engineering* ISSN. Vol. 3. Is. 10.

110. Zarezade, T. & Payvandy, P. (2019). 3D Garment Design using Interactive Genetic Algorithm and Clustering. *Trends in Textile. Engineering & Fashion. Technology.* Vol. 5. Is. 1. DOI: <https://doi.org/10.31031/TTEFT.2019.05.000604>.

111. BASF and Reebok BASF and Reebok to Release Additional 3D Printed Liquid Speed Shoes, More Projects in Development. URL: <https://3dprint.com/221344/basf-reebok-liquid-speed/>. (дата звернення 02.12.2023).

112. Що потрібно врахувати при замовленні друку на тканині. URL: <https://triada-m.com/osobennosti-pechati-na-tkani>. (дата звернення 02.12.2023).

113. Nayak, R., Padhye, R., Wang, L., Chatterjee, K. & Gupta, S. (2015). The role of mass customisation in the apparel industry. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education.* Vol. 8. Is. 2. pp. 162-172. DOI: <https://doi.org/10.1080/17543266.2015.1045041>.

114. Cho, Y.S., Tsuchiya, K., Takatera, M., Inui, S., Park, H. & Shimizu, Y. (2010). Computerized pattern making focus on fitting to 3D human body shapes. *International Journal of Clothing. Science and Technology.* Vol. 22. Is. 1. pp. 16–24. DOI: <https://doi.org/10.1108/09556221011008776>.

115. Поліщук А.О., Маковський С.В., Поліщук А.О. Розробка 3D сканера. *Технічна творчість: Збірник наукових праць.* Хмельницький : ХНУ, 2016. № 1. С. 55-57.

116. Polishchuk A., Slavinska A., Polishchuk O., Mytsa V. (2023). Production of details of difficult designs of footwear and clothes with use of technologies of additive production. *AIP Conference Proceedings.* Vol. 2889. Is. 17. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0172971>.

117. Поліщук А., Місяць В. Моделювання шнекового екструдера 3D-принтера, що використовує гранули або подрібнені відходи полімеру в якості вихідної сировини. *Український журнал прикладної економіки та техніки.* 2023. №4. С.329-334. DOI: <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2023-4-53>.

118. Поліщук А., Поліщук О. Розробка методу проектування шнека

екструдера 3D-принтера. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2023. № 4. С. 389-402. DOI: <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2023-323-4-389-402>.

119. Polishchuk A., Polishchuk O., Skyba M., Rubanka M. Dependence of the form of the 3D printer extruder screw from the properties of the polymer material. *Технічна творчість : зб. наук. праць. Хмельницький : ХНУ, 2023. № 6. С. 5-6.* <http://surl.li/nqjjpg>.

120. Зозуля П.Ф., Поліщук О.С., Поліщук А.О. Екструдер для перероблення полімерних матеріалів. Патент на корисну модель №142922 Україна. МПК В29С 48/00, В29С 48/505 (2019.01), заявник і патентовласник Зозуля П.Ф. u201909761; заявл. 12.09.19; опубл. 10.07.20. Бюл. № 13. <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=269516>.

121. Поліщук А., Поліщук О. Розрахунок шнеку екструдера пристрою тривимірного друку на міцність з використанням програмного середовища Solidworks Simulation. *Технічна творчість: творчість : зб. наук. праць. Хмельницький : ХНУ, 2023. № 7. С. 45-48.*

122. Поліщук А.О. Розробка системи охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера. *Технології та інжиніринг*. 2023. № 6. С. 53-75. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.6.5>.

123. Поліщук А.О., Скиба М.Є., Поліщук О.С. Фактори, що впливають на нагрівання корпусу екструдера 3D-принтера. *Мехатронні системи : інновації та інжиніринг: тези доповідей VII Міжнародної наук.-практ. конф. / Київ : КНУТД, 2023. С. 128-129. ISBN 978-617-7763-27-6.* <https://zenodo.org/records/10202155>.

124. Поліщук А., Скиба М., Поліщук О. Моделювання роботи шнекового екструдера 3D-принтера в програмному середовищі Solidworks Flow Simulation. *Технічна творчість: творчість : зб. наук. праць. Хмельницький : ХНУ, 2023. № 7. С. 35-37.*

125. 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. pp. 462-466.

126. Поліщук А.О. Експериментальне дослідження об'ємної продуктивності шнекового екструдера 3D-принтера. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2023. №4. С. 117-128. <http://surl.li/qcyav>.

127. Поліщук А., Скиба М. Експериментальне дослідження зразків, виготовлених із подрібнених полімерних відходів на 3D-принтері зі шнековим екструдером. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2023. № 6. С.292-306. DOI: <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2023-329-6-292-306>.

128. Поліщук А., Поліщук О., Скиба М., Лісевич С. 3D-друк виробів для військових та цивільного населення України. Технічна творчість: творчість : зб. наук. праць. Хмельницький : ХНУ, 2022. № 5. С. 5-6. <http://surl.li/nqjtl>.

## ДОДАТОК А.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.*

1. Поліщук А., Поліщук О. Розробка методу проєктування шнека екструдера 3D-принтера. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2023. № 4. С. 389-402. DOI: <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2023-323-4-389-402>.

2. 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. DOI: <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2023-325-5-192-204>.

3. 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. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.5.3>.

4. Поліщук А.О. Розробка системи охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера. *Технології та інжиніринг*. 2023. № 6. С.53-75. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.6.5>.

5. Поліщук А.О. Експериментальне дослідження подрібнених полімерних відходів, що використовуються в якості вихідної сировини шнекового екструдера 3D-принтера. *Наукові нотатки. Луцький національний університет*. 2023. Випуск № 76. С.134-146. DOI: <https://www.doi.org/10.36910/775.24153966.2023.76.19>.

6. Polishchuk A.; Slavinska A., Polishchuk O., Mytsa V. (2023). Production of details of difficult designs of footwear and clothes with use of technologies of additive production. *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2889. Is. 17. (Scopus). DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0172971>.

7. Поліщук А., Скиба М. Експериментальне дослідження зразків, виготовлених із подрібнених полімерних відходів на 3D-принтері зі шнековим

екструдером. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2023. № 6. С.292-306. DOI: <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2023-329-6-292-306>.

8. Поліщук А.О. Експериментальне дослідження об'ємної продуктивності шнекового екструдера 3D-принтера. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2023. №4. С.117-128.

[http://kntu.net.ua/index.php/eng/content/download/111414/628411/file/%D0%92%D1%96%D1%81%D0%BD%D0%B8%D0%BA%204%20\(87\).pdf](http://kntu.net.ua/index.php/eng/content/download/111414/628411/file/%D0%92%D1%96%D1%81%D0%BD%D0%B8%D0%BA%204%20(87).pdf).

9. Поліщук А., Місяць В. Моделювання шнекового екструдера 3D-принтера, що використовує гранули або подрібнені відходи полімеру в якості вихідної сировини. *Український журнал прикладної економіки та техніки*. 2023. №4. С.329-334. DOI: <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2023-4-53>.

10. Зозуля П.Ф., Поліщук О.С., Поліщук А.О. Перспективи застосування 3D-друку в легкій промисловості. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2017. № 4. С.102-104. [http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2017/2017\\_4/\(251\)%202017-4-t.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2017/2017_4/(251)%202017-4-t.pdf).

11. Поліщук О.С., Зозуля П.Ф., Поліщук А.О. Узагальнена класифікація філаментів для 3D-друку. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2017. № 6. С.51-59. [http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2017/2017\\_6/\(255\)%202017-6-t.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2017/2017_6/(255)%202017-6-t.pdf).

12. Polishchuk, O., Zozulia, P., Polishchuk, A., Maidan, P., Skyba, M., Kostyuk, N., Kravchuk, A. & Kravchuk, O. (2020). Development and research of equipment for processing of granulated polymeric materials via 3d printing for the needs of light industry. *Fibres and Textiles*. 27(4). pp. 75-80. (Scopus). URL: [http://vat.ft.tul.cz/2020/4/VaT\\_2020\\_4\\_10.pdf](http://vat.ft.tul.cz/2020/4/VaT_2020_4_10.pdf).

13. Зозуля П.Ф., Поліщук О.С., Поліщук А.О. Екструдер для перероблення полімерних матеріалів. Патент на корисну модель №142922 Україна. МПК В29С 48/00, В29С 48/505 (2019.01), заявник і патентовласник

Зозуля П.Ф. u201909761; заявл. 12.09.19; опубл. 10.07.20. Бюл. № 13.  
<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=269516>.

*Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.*

14. Поліщук А.О., Скиба М.Є., Поліщук О.С., Лісевич С.П. Робот-маніпулятор з функцією 3D-друку для виконання операцій легкої промисловості. Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку: матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції (29-30 жовтня 2020 р.): збірник тез. – Луцьк: Луцький НТУ, 2020. – С.71-72.  
[https://restore.lntu.edu.ua/oldfiles/files12/zbirnik\\_tez\\_luck\\_2020.pdf](https://restore.lntu.edu.ua/oldfiles/files12/zbirnik_tez_luck_2020.pdf).

15. Поліщук О.С., Скиба М.Є., Поліщук А.О., Лісевич С.П. Перспективи створення обладнання для виготовлення монофіламенту для 3D-друку. Збірник тез доповідей XX Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсозберігаючі технології та обладнання» (28-29 квітня 2021 р.) / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2021. – С.119-122. [https://ci.kpi.ua/METODA/20\\_teza\\_mizhnarodna.pdf](https://ci.kpi.ua/METODA/20_teza_mizhnarodna.pdf).

16. Поліщук А.О., Скиба М.Є., Лісевич С.П., Ткачук О.Л. Переробка відходів полімерних матеріалів легкої промисловості у готові вироби з використанням адитивних технологій. Збірник матеріалів VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування» (25-28 травня 2021 р.) м. Луцьк. – С.68-69. <http://surl.li/qrskt>.

17. Polishchuk A., Skyba M., Polishchuk O., Mitsa V. 3D printing in the manufacture of sewing products. IX Ukrainian-Polish Scientific Dialogues: Conference Proceedings. International Scientific Conference, 20-23 October 2021, Khmelnytskyi (Ukraine). Khmelnytskyi National University, 2021. – pp. 112-114.  
<https://elar.khmnu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/49279c39-2b87-41a2-b0f7-bfffb17ba796/content>.

18. Polishchuk A.O., Skyba M.Ye., Tanski T., Polishchuk O.S. Prospects of recycling polyethylene terephthalate waste into consumables for 3D printers. Мехатронні системи: інновації та інжиніринг: тези доповідей V Міжнародної

науково-практичної конференції, 4 листопада 2021р. – Київ: КНУТД, 2021. – С.92-93. [https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/19210/1/MSIE\\_2021\\_P092-093.pdf](https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/19210/1/MSIE_2021_P092-093.pdf).

19. Polishchuk A., Tański M.T. Development of technologies and equipment for recycling polyethylene terephthalate waste into consumables and finished product. Material Technologies of Silesia. MTS Conference. Prace Katedry Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych (June 2022). Gliwice, Poland. – pp.131-132. [https://mts.polsl.pl/pl/?page\\_id=43](https://mts.polsl.pl/pl/?page_id=43).

20. Поліщук А., Скиба М. 3D-принтер для друку гранулами та подрібненими відходами полімерних матеріалів. Сучасні тенденції розвитку інженерії, технологій та транспорту: збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, 18-19 жовтня 2022 р. – Хмельницький : ХНУ, 2022. – С.367-370. <http://surl.li/qsxkb>.

21. Polishchuk A.O., Polishchuk O.S., Rubanka M.M. Prospects of use of «rPET» material in quality of raw materials for 3D printing. Мехатронні системи: інновації та інжиніринг : тези доповідей VI Міжнародної наук.-практ. конф. / Київ : КНУТД, 2022. – р.59.

[https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/20668/1/MSIE\\_2022\\_P059.pdf](https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/20668/1/MSIE_2022_P059.pdf).

22. Polishchuk O., Bonek M., Polishchuk A., Lisevich S., Grudin V., Matiukh S. Manufacturing of products and parts by 3D printing from composite threads containing metals. The International Student Scientific Conference TalentDetector2023\_Winter: Prace Katedry Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych. Gliwice: Politechnika Śląska. 2023. pp. 12-27. <https://pimib.polsl.pl/pdf/Talent-Detector-Winter-2023-druk.pdf>.

23. Polishchuk A.O., Polishchuk O.S., Skyba M.Ye., Lisevich S.P. Development of technology for processing polymer waste into finished products by 3D printing. Збірник тез доповідей III-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту - 2023»: Збірник тез [Електронний ресурс]. – Вінниця: ВНТУ. – 2023. – С.457-459. ISBN



978-966-641-935-7.

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/778/1355/2610-1>.

24. Polishchuk A., Polishchuk O., Rubanka M. Development of 3D printing equipment using a mixture of polymer material and metal powder. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2023) : матеріали тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 25–26 травня 2023 р.) : у 2 т. / Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.] ; відп. за вип.: Єрошенко Андрій Михайлович [та ін.]. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – Т. 1. – С.204-205.

<https://conference-chernihiv-polytechnik.com/wp-content/uploads/2023/06/Tezy-2023-Part-1.pdf>.

25. Polishchuk A., Skyba M., Polishchuk O., Lisevich S. Shredding of polymer waste of light industry. Матеріали (тези). IX Міжнародна науково–практична конференція «Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування». – Луцьк,: Вежа-Друк – 2023. – С.55-56. <http://surl.li/qsxja>.

26. Polishchuk A., Polishchuk O., Bonek M., Brytan Z., Lisevich S. Development of technology for processing of polymer waste of light industry into finished products using 3D printers. The International Student Scientific Conference TalentDetector2023\_ Summer: Prace Katedry Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych. Gliwice: Politechnika Śląska. 2023. pp. 548-557. <https://pimib.polsl.pl/pdf/Talent-Detector-Summer-2023.pdf>.

27. Поліщук А.О., Скиба М.Є., Поліщук О.С. Фактори, що впливають на нагрівання корпусу екструдера 3D-принтера. Мехатронні системи : інновації та інжиніринг: тези доповідей VII Міжнародної наук.-практ. конф. / Київ : КНУТД, 2023. С.128-129. ISBN 978-617-7763-27-6. <https://zenodo.org/records/10202155>.

28. Поліщук А. Нанесення об'ємних зображень на деталі одягу та взуття з використанням 3D-друку. Ресурсозберігаючі технології легкої, текстильної і харчової промисловості: збірник тез доповідей Міжнародної науково-

практичної Інтернет-конференції молодих вчених та студентів, 22 листопада 2023 р. – Хмельницький: ХНУ, 2023. – С.178-179.

<https://tksv.khmnu.edu.ua/inetconf/2023/khnu2023.pdf>.

29. Polishchuk A.O., Skyba M.Ye., Polishchuk O.S. Equipment for processing pet bottles into raw materials for the screw extruder of the 3D printer. Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування: матеріали VI Всеукр. наук.-практ. Інтернет-конференції (Полтава, 21-22 грудня 2023 р.) / ПДАУ: ред. кол., О. І. Біловод, С. В. Попов, Р. М. Харак, О. В. Цуркан [та ін.]. – Полтава : ПДАУ, 2023. – С.142-145.

<https://www.pdau.edu.ua/sites/default/files/node/11413/zbirnyk2022.pdf>.

*Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації.*

30. 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. Вип. № 67. С.48-52.

[https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi\\_notatky/issue/view/34/42](https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky/issue/view/34/42).

31. 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. DOI: <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-309-3-104-110>.

32. 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.252-262. DOI: <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2023-319-1-252-262>.

33. Поліщук О.С., Поліщук А.О., Пундик С.І. Виготовлення 3D принтера для навчального процесу. *Технічна творчість : зб. наук. праць*. Хмельницький : ХНУ, 2016. № 1. С. 52-55. <http://surl.li/qsxno>.

34. Polishchuk O., Skyba M., Polishchuk A., Lisevich S., Zozulia P., Voitsekhov D. Engineering calculations of strength of the details made by 3D-

printing method. *Технічна творчість* : зб. наук. праць. Хмельницький : ХНУ, 2021. № 4. С. 33-34. <http://surl.li/nqjxx>.

35. Поліщук А., Поліщук О., Скиба М., Лісевич С. 3D-друк виробів для військових та цивільного населення України. *Технічна творчість* : зб. наук. праць. Хмельницький : ХНУ, 2022. № 5. С. 5-6. <http://surl.li/nqjtl>.

36. Polishchuk A., Polishchuk O., Skyba M., Rubanka M. Dependence of the form of the 3D printer extruder screw from the properties of the polymer material. *Технічна творчість* : зб. наук. праць. Хмельницький : ХНУ, 2023. № 6. С. 5-6. <http://surl.li/qsrxr>.

37. 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. pp. 462-466. [https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/18936/6/Mono\\_Poland\\_P462-466.pdf](https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/18936/6/Mono_Poland_P462-466.pdf).

38. Поліщук А., Поліщук О. Розрахунок шнеку екструдера пристрою тривимірного друку на міцність з використанням програмного середовища Solidworks Simulation. *Технічна творчість* : зб. наук. праць. Хмельницький : ХНУ, 2023. № 7. С. 45-48. <http://surl.li/qrsiq>.

## ДОДАТОК Б.

## ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Поліщука Андрія Олеговича

«Удосконалення обладнання тривимірного друку для виготовлення деталей

та виробів легкої промисловості»

за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

*Масові наукові, науково-теоретичні та науково-практичні заходи**міжнародного рівня:*

1. XX Міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання» (Україна, м.Київ, 28-29 квітня 2021р.). Форма участі – виступ на секційному засіданні на тему: «Перспективи створення обладнання для виготовлення монофіламенту для 3D-друку».

2. VIII Міжнародна науково-практична конференція «Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування» (Україна, Луцьк, 25-28 травня 2021р.). Форма участі – виступ на секційному засіданні на тему: «Переробка відходів полімерних матеріалів легкої промисловості у готові вироби з використанням адитивних технологій».

3. Міжнародна конференція «IX Українсько-польські наукові діалоги» (Україна, м.Хмельницький, 20-23 жовтня 2021р.). Форма участі – виступ на секційному засіданні на тему: «3D printing in the manufacture of sewing products».

4. V Міжнародна науково-практична конференція «Мехатронні системи: інновації та інжиніринг» (Україна, м.Київ, 4 листопада 2021р.). Форма участі – виступ на секційному засіданні на тему: «Prospects of recycling polyethylene terephthalate waste into consumables for 3D printers».

5. International Conference on Technics, Technologies and Education ICTTE 2021. (Bulgaria, Yambol, November 3-5, 2021). Форма участі – виступ на

секційному засіданні на тему: «Production of details of difficult designs of footwear and clothes with use of technologies of additive production».

6. International Students Scientific Conference (Poland, Gliwice, 28th January 2022). Форма участі – виступ на секційному засіданні на тему: «System of adaptive frequency control of speed of rotation of the asynchronous three-phase electric motor of the drive of the rotary crusher for crushing of polymeric materials».

7. International Scientific MTS Conference (Poland, Gliwice, June 12-15, 2022). Форма участі – виступ на секційному засіданні на тему: «Development of technologies and equipment for recycling polyethylene terephthalate waste into consumables and finished product».

8. Міжнародна науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Сучасні тенденції розвитку інженерії, технологій та транспорту» (Україна, м.Хмельницький, 18-19 жовтня 2022р.). Форма участі – виступ на секційному засіданні на тему: «D-принтер для друку гранулами та подрібненими відходами полімерних матеріалів».

9. VI Міжнародна науково-практична конференція «Мехатронні системи: інновації та інжиніринг» (Україна, м.Київ, 24 листопада 2022р.). Форма участі – виступ на секційному засіданні на тему: «Prospects of use of «rPET» material in quality of raw materials for 3D printing».

10. International Students Scientific Conference (Poland, Gliwice, 27th January 2023). Форма участі – виступ на секційному засіданні на тему: «Development of technology for processing of polymer waste of light industry into finished products using 3D printers».

11. XIII Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Україна, м.Чернігів, 25-26 травня 2023р.). Форма участі – виступ на секційному засіданні на тему: «Development of 3D printing equipment using a mixture of polymer material and metal powder».

12. IX Міжнародна науково-практична конференція «Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та

машинобудування» (TERMM-2023) (Україна, Луцьк, 30 травня–1 червня 2023р.). Форма участі – виступ на секційному засіданні на тему: «Shredding of polymer waste of light industry».

13. III Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2023» (Україна, Вінниця, 01–03 червня 2023р.). Форма участі – виступ на секційному засіданні на тему: «Development of technology for processing polymer waste into finished products by 3D printing».

14. Міжнародний симпозіум «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (SIEMA' 2023) (Україна, м.Харків, 26- 27 жовтня 2023р.) Форма участі – виступ на секційному засіданні на тему: «Кроковий двигун з оптимальними параметрами для приводу екструдера 3D-принтера, що друкує гранулами».

15. Міжнародна науково-практична Інтернет-конференція молодих вчених та студентів «Ресурсозберігаючі технології легкої, текстильної і харчової промисловості» (Україна, м.Хмельницький, 22 листопада 2023р.). Форма участі – виступ на секційному засіданні на тему: «Нанесення об'ємних зображень на деталі одягу та взуття з використанням 3D-друку».

16. VII Міжнародна науково-практична конференція «Мехатронні системи: Інновації та інжиніринг» (Україна, м.Київ, 23 листопада 2023р.). Форма участі – виступ на секційному засіданні на тему: «Перспективи розробки обладнання для подрібнення відходів 3D-друку».

*Масові наукові, науково-теоретичні та науково-практичні заходи  
всеукраїнського рівня:*

17. IV Всеукраїнська науково-практична конференція «Приладобудування та метрологія: Сучасні проблеми, тенденції розвитку» (Україна, м.Луцьк, 29-30 жовтня 2020р.). Форма участі – виступ на секційному засіданні на тему: «Робот-маніпулятор з функцією 3D-друку для виконання операцій легкої промисловості».

18. VI Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування» (Україна, м.Полтава, 21-22 грудня 2023р.). Форма участі – виступ на секційному засіданні на тему: «Equipment for processing pet bottles into raw materials for the screw extruder of the 3D printer».

ДОДАТОК В.  
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ, ПАТЕНТИ



**АКТ**

про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи  
Поліщук А.О. «Удосконалення обладнання тривимірного друку для  
виготовлення деталей та виробів легкої промисловості»

Результати дисертаційної роботи використані в навчальному процесі кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету при оновленні курсу лекцій з дисципліни «Сучасні 3D-технології виробництва» для підготовки бакалаврів за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» (освітня програма «Робототехнічні та мехатронні системи галузі») та дисципліни «Сучасні технології та обладнання виробництв галузі» для підготовки магістрів за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» (освітня програма «Галузеве машинобудування»).

Розроблено дві лабораторні роботи з дисципліни «Сучасні 3D-технології виробництва»: «Пристрій тривимірного друку з шнековим екструдером, що використовує гранули чи подрібнені відходи полімерів» та дисципліни «Сучасні технології та обладнання виробництв галузі»: «Дослідження ресурсозберігаючої адитивної технології переробки гранул чи полімерних відходів з використанням пристрою тривимірного друку з шнековим екструдером».

Акт обговорений і схвалений на засіданні кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету (протокол №1 від 28 серпня 2023 року).

Зав. кафедри машин і апаратів,  
електромеханічних та енергетичних  
систем, д.т.н., проф.

Олег ПОЛІЩУК



«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Директор

ТОВ «Спарк-Швейне обладнання»

Михайло КРАСІЙ

« 6 » жовтня 2023 р.

про впровадження у виробничу діяльність підприємства результатів дисертаційної роботи Поліщука А.О.  
на тему: «*Удосконалення обладнання тривимірного друку для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості*»

Ми, ті, що нижче підписалися, представник ТОВ «Спарк-Швейне обладнання» інженер-механік Шуріпа П.А. і представник Хмельницького національного університету Поліщук А.О. склали цей акт про те, що впроваджено у виробничу діяльність підприємства обладнання тривимірного друку для виготовлення деталей швейного обладнання.

Використання устаткування тривимірного друку відкрило нові можливості для підприємства «Спарк-Швейне обладнання», зокрема у сфері швидкого та точного виготовлення замінних деталей для швейного обладнання, що вийшло з ладу. Впроваджене інноваційне рішення значно зменшило час на ремонт та обслуговування устаткування, сприяючи підвищенню рівня задоволеності клієнтів.

Використання цього пристрою, дозволило ефективно розв'язувати питання несправності обладнання, забезпечуючи швидке вирішення проблем без потреби довготривалого очікування поставок замінних частин. Це не лише зменшило витрати на закупівлю деталей, але й підвищило оперативність обслуговування.

Економічний ефект від впровадження обладнання проявився в зменшенні витрат на замінні частини та скороченні простою обладнання, а також в зростанні лояльності та задоволення клієнтів завдяки оперативному обслуговуванню. Впровадження устаткування тривимірного друку стало значним внеском у розвиток інноваційної стратегії підприємства ТОВ «Спарк-Швейне обладнання», відкриваючи нові перспективи для розвитку сервісних послуг.

**Представник  
ТОВ «Спарк-Швейне обладнання»:**

Інженер-механік

  
Павло ШУРІПА

**Представник Хмельницького  
національного університету:**

  
Андрій ПОЛІЩУК



### АКТ

про впровадження у виробництво результатів дисертаційної роботи Поліщука А.О. на тему: *«Удосконалення обладнання тривимірного друку для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості»*

Ми, ті, що нижче підписалися, представник ПМП «Вітнед» головний технолог Самотес К.С. і представник Хмельницького національного університету к.т.н., доц. Поліщук А.О. склали цей акт про те, що впроваджено у виробництво обладнання тривимірного друку для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості.

Підприємство «Вітнед», що спеціалізується на виготовленні швейних виробів, зіткнулося з потребою у модернізації технологічного процесу. Основними викликами були необхідність унікалізації дизайну продукції та оптимізація використання матеріалів.

Впровадження обладнання тривимірного друку дозволило ефективно вирішити ці завдання. Використання повітряного устаткування забезпечило високу точність та якість виготовлення деталей об'ємного друку, зниження відходів матеріалів та збільшення гнучкості у створенні оригінальних швейних виробів.

Економічний ефект від впровадження обладнання проявився у підвищенні продуктивності, зменшенні виробничих витрат та підвищенні конкурентоспроможності продукції на ринку.

Іновативний підхід до процесу виготовлення готової продукції дозволив підприємству «Вітнед» відкрити нові можливості для розвитку та задоволення зростаючих потреб клієнтів.

Економічний ефект від впровадження наукових результатів дисертаційної роботи Поліщука А.О. склав 42 тис. грн.

Представник  
ПМП «Вітнед»:  
Головний технолог



Катерина САМОТЕС

Представник Хмельницького  
національного університету:

Андрій ПОЛІЩУК

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Директор ПП «КМ-Поділля»  
Веніамін МЕЛЬНИК

\_\_\_\_\_ 2023 р.



про впровадження у виробництво результатів дисертаційної роботи Поліщука А.О. на тему: **«Удосконалення обладнання тривимірного друку для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості»**

Ми, ті, що нижче підписалися, представник ПП «КМ-Поділля» технічний директор Кізіков О.М. і представник Хмельницького національного університету Поліщук А.О. склали цей акт про те, що впроваджено у виробництво обладнання тривимірного друку для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості.

Підприємство «КМ-Поділля», спеціалізуючись на виробництві взуття для бальних танців та військових потреб, стикається з проблемами створення об'ємних полімерних зображень на взутті та утилізації пластикових відходів. Впровадження розробленого пристрою тривимірного друку дозволило ефективно вирішити ці проблеми.

Використання такого устаткування не лише полегшило процес нанесення декору на взуття, але й забезпечило можливість переробки пластикових відходів, значно знижуючи витрати на утилізацію. Це не тільки сприяло підвищенню якості та естетики продукції, але й забезпечило значну економію коштів та ресурсів, зменшуючи екологічний вплив виробництва.

Економічний ефект від впровадження пристрою проявився в зниженні виробничих витрат на матеріали та утилізацію, підвищенні продуктивності та рентабельності виробництва. Впровадження інноваційного обладнання дозволило підприємству «КМ-Поділля» вийти на новий рівень якості продукції та ефективності процесів, відкриваючи нові можливості для розвитку та зміцнення позицій на ринку.

Економічний ефект від впровадження наукових результатів, склав 55 тис. грн.

Представник  
ПП «КМ-Поділля»

Технічний директор



Олександр КІЗІКОВ

Представник Хмельницького  
національного університету:



Андрій ПОЛІЩУК



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **142922** (13) **U**  
 (51) МПК (2020.01)  
**B29C 48/00**  
**B29C 48/505** (2019.01)

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ  
 ЕКОНОМІКИ, ТОРГІВЛІ ТА  
 СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА  
 УКРАЇНИ

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: <b>u 2019 09761</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>12.09.2019</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>10.07.2020</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>10.07.2020, Бюл.№ 13</b></p>	<p>(72) Винахідник(и):  <b>Зозуля Петро Федорович (UA),          Поліщук Андрій Олегович (UA),          Поліщук Олег Степанович (UA)</b></p> <p>(73) Власник(и):  <b>Зозуля Петро Федорович,          вул. Інститутська, 11, к. 418, м.          Хмельницький, 29016 (UA)</b></p>
--	---

## (54) ЕКСТРУДЕР ДЛЯ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

### (57) Реферат:

Екструдер для перероблення полімерних мас містить корпус із завантажувальним і розвантажувальним отворами, а також розміщеним у ньому з можливістю обертання шнеком, нарізка якого з внутрішньою поверхнею корпусу утворює робочий канал з послідовно розташованими зонами подавання, плавлення й гомогенізації. Містить конструкцію корпусу, який розташовують вертикально, а подачу здійснюють завдяки кроковому двигуну, при цьому необхідну температуру в зоні плавлення забезпечує додатковий нагрівач.

ДОДАТОК Г.  
СОПЛО ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА ТА ЙОГО ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ  
ВЛАСТИВОСТІ



Рисунок Г.1 – Загальний вигляд латунного сопла для 3D-принтера:  
*a* – MakerBot; *б* – Ultimaker

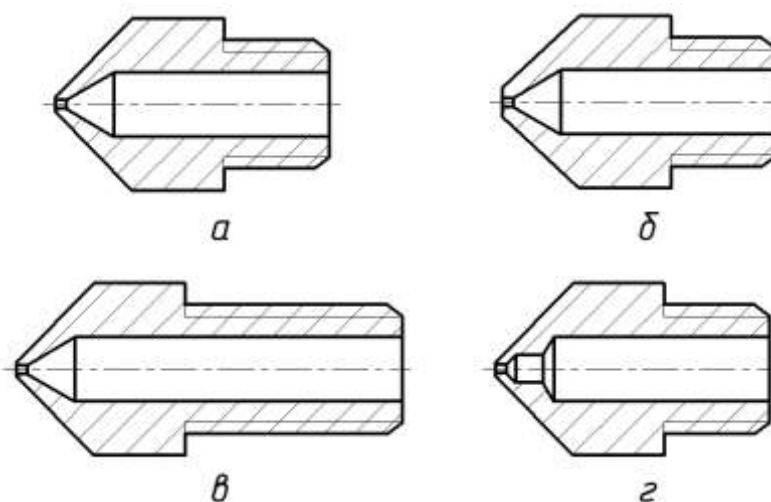


Рисунок Г.2 – Конструкція сопел: *a* – з вузькою площиною навколо вихідного отвору; *б* – з широкою площиною навколо вихідного отвору; *в* – з подовженою різьбовою частиною; *г* – з додатковим циліндричним каналом



Рисунок Г.3 – Сопло в розрізі: *a* – з циліндричним та конічним каналом;  
*б* – з додатковим циліндричним каналом



Рисунок Г.4 - Загальний вигляд сопел з різними діаметрами



Рисунок Г.5 – Загальний вигляд сопел діаметра 0,4 мм: *а* – латунне; *б* – зі спеціальним покриттям; *в* – з нержавіючої сталі; *г* – із високоміцної загартованої сталі; *д* – з карбід-вольфрамовим наконечником; *е* – з рубіновим наконечником

Таблиця Г.1

Фізико-механічні властивості сопел, виготовлених з різних матеріалів

№ п/п	Матеріал	Теплопровідність, Вт/м·К	Твердість, Mohs	Макс. температура друку, °С	Коефіцієнт температурного розширення	Матеріал друку
1	Латунь	105	3,0	300	18,0	PLA, ABS, TPU, PETG тощо
2	Нержавіюча сталь	17	5,0	500	6,0	PEEK, PEI, POC, Carbon, metal тощо
3	Загартована сталь	22	7,8	500	8,0	
4	Карбід вольфраму	29	9,0	550	3,9	
5	Рубін	45	9,0	550	5,3	Всі матеріали

ДОДАТОК Д.  
ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛІМЕРІВ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ  
ПО ЇХ ВИБОРУ ДЛЯ 3D-ДРУКУ

Таблиця Д.1.

Основні технічні характеристики 3D полімерних матеріалів

№ п/п	Матеріал	Технічні характеристики філаментів										Виробник
		Густина, г/см <sup>3</sup>	Границя міцності, МПа	Модуль пружності, МПа	Відн. вдовж. на розрив і розтяг, %	Литтєва усадка, %	Поверхневий опір, Ом	Температура екструзії при друку, °С	Температура стола при друку, °С	Швидкість друку, мм/с	Діаметр нитки пластику, мм	
1	ABS	1,04	38	2700		0,4-0,7		210-270	110	40-70	1,75; 3	Esun, Китай
2	ABS <sup>+</sup>	1,06	38	2800	4	0,1		215-230	80-95	40-80	1,75;3	MonoFilament, Україна
3	PLA	1,2	40	2265	5			210-255	110-120	40-70	1,75; 3	3DDDevice, Китай
4	PET флуоресцентний	1,04	36	2265	4			210-245	110-120	40-70	1,75	3DDDevice, Китай
5	ABS Conductive	1,15	45	2000	10		10 <sup>3</sup> -10 <sup>5</sup>	210-270	110	40-70	1,75	3DDDevice, Китай
6	Carbon Fiber	1,11	44	4018	1,8		більше 10 <sup>10</sup>	220-240	100-110	50-70	1,75	ColorFab, Голандія
7	Carbon Fiber XT-CF20	1,3	76			0,2-0,4	10 <sup>9</sup>	240-260		40-70		ColorFabb, Голандія
8	Carbon Esun EPA-CF	1,14	63,9	4387	4		10 <sup>10</sup>	240-260	80	30-60	1,75	Esun, Китай
9	PLA+	1,24	60		29	-		205-250	60-80	40-60	1,75; 3	Esun, Китай
10	BronzeFill	3,9						195-220	55-60		1,75;2,85	ColorFabb, Голандія
11	PETG Clear	1,38	55-57	280-3100				210-220	65	20-40	1,75;3	3DDDevice, Китай
12	PLA Aluminium	1,29						190-230	0-60	30-150	1,75;3	3DDDevice, Китай
13	PEEK	1,4	200	3600	25	0,1-0,3	3x10 <sup>6</sup>	380			1,75	3DDDevice, Китай
14	CoPET	1,27	70	2100	5	0,2		230-240	40-70	40-60	1,75	MonoFilament, Україна
15	POM	1,41	65,5	2758	30		10 <sup>3</sup> -10 <sup>5</sup>	250-270			1,75	3DDDevice, Китай
16	Primalloy	1,09	85					210-235	40-50		1,75	Verbatim, Японія
17	TPU	1,25	79,97					200-220	80-100	30-50	1,75	3DDDevice, Китай
18	HIPS	1,05		2400		0,8		230-240	90-100	30-60	1,75;3	MonoFilament, Україна
19	PLC	1,16	29		11			70-100			1,75	Esun, Китай
220	FCoPet	1,27	570	22100				2230-240	440-70	440-60	11,75	MonoFilament, Україна
21	Flex	1,2	35			500		220-250	100-110		1,75	3DDDevice, Китай
22	PET	1,38	55-75	33000				210-230	80	40-60	1,75	3DDDevice, Китай
23	BronzeFill	1,2						190-210	60	30-60	1,75	Esun, Китай

Рекомендації по використанню 3D полімерних матеріалів для  
виготовлення деталей та виробів

№ п/п	Назва деталі виробу	Матеріал для використання
1	Швейні вироби: деталі одягу швейна фурнітура	Elastan, PLC, Nylon
		ABS, HIPS, PC, PLC
2	Взуттєві вироби	PLA, PLA+, Filaflex, PLC, TPU
3	Галузеве машинобудування: корпуси деталей зубчаті колеса і деталі механічних передач різьбові з'єднання електричні пристрої, плати підшипники, деталі ковзання, шестерні	ABS, CoPet, ABS <sup>+</sup>
		PET, PC, PBT, Nylon, Plastan, ABS
		PC, PBT
		ABS Conductive
		POM, Nylon, PET флуоресцентний
4	Деталі автомобілей, літаків	Carbon Fiber XT-CF20, Carbon Fiber, PC
5	Деталі холодильних камер	PLA, PET, PEEK
7	Механічні вузли, корпуси виробів	Carbon Fiber XT-CF20, Carbon Fiber, PET, CoPet
8	Електроніка, електромонтажна фурнітура	PET, PEEK, POM, HIPS, ABS Conductive, Nylon
9	Термостійкі матеріали	PC, ABS Conductive PET флуоресцентний, PET, Nylon, PEEK
10	Струмопровідні матеріали	ABS Conductive, BronzeFill, BambooFill
11	Вогнетривкі матеріали	вогнетривкий ABS, PEEK
12	Деталі для імітації дерев'яних поверхонь	BambooFill
13	Деталі для імітації металевих поверхонь	BronzeFill, PLA Aluminium, PLA Brass, PLA Copper
14	Вироби побутового призначення	PETG Clear, PLC, PP, T- Glace
15	Акcesуари	Color Changing
16	Зносостійкі матеріали	TPU, PET, Primalloy, PEEK



ДОДАТОК Е.  
СТУПІНЬ СТИСНЕННЯ ШНЕКА ЕКСТРУДЕРА

Таблиця Е.1.

Ступінь стиснення шнека екструдера

№ п/п	Матеріал	Ступінь стиснення
1	Полілактид PLA	2,5-3,0:1
2	Акрилонітрил-бутадієн-стирол ABS	2,75:1
3	Термопластичний поліуретановий еластомер TPU	2,0-3,0:1
4	Термопластичний еластомер TPE*	2,0-3,5:1
5	Полівінілхлорид PVC	1,75-2,5:1
6	Полістирол PS	3,0-3,5:1
7	Поліпропілен PP	3,0-4,0:1
8	Поліетилен PE	2,0-4,0:1
9	Полікарбонат	2,25:1
10	Поліамід PA	3,0-4,0:1
11	Поліетилентерефталат PET	3,5-3,7:1

\* – для спеціальних шнеків із короткими зонами, що працюють на малих швидкостях коефіцієнт стиснення може складати 3,0-4,0:1.

ДОДАТОК И.  
ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ  
ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА

$$\lambda_{зох.} := 1 \quad i := 2.75 \quad L_{муф.} := 20 \text{ мм} \quad v_{ек} := 80 \text{ мм/с}$$

$$L_{ц.к.1} := 0.5 \text{ мм} \quad L_{ц.к.2} := 0.5 \text{ мм} \quad d_{ц.к.2} := 1.2 \text{ мм} \quad L_{ц.к.3} := 11 \text{ мм}$$

$$d_{от.3} := 1.2 \text{ мм} \quad k_{впрот} := 0.85$$

1. Визначаємо діаметр шнека  $D_{шн}$  :

$$D_{шн.р.} := \sqrt[2]{\frac{v_{ек} \cdot \pi \cdot d_c^2}{0.68 \cdot 4}}$$

$$D_{шн.р.} = 7.7 \text{ мм}$$

Приймаємо  $D_{шн} := 8 \text{ мм}$

2. Визначаємо довжину шнека  $L_{шн}$  :

$$L_{шн} := 8 \dots 15 \cdot D_{шн}$$

$$L_{шн} := 8 \cdot D_{шн} = 64 \text{ мм}$$

3. Визначаємо загальну довжину шнека  $L_{шн.з}$  :

$$L_{шн.кр} := 1.8 \dots 1.85 \frac{L_{муф.}}{2}$$

$$L_{шн.кр} := 1.83 \frac{L_{муф.}}{2}$$

$$L_{шн.кр} = 18.3 \text{ мм}$$

$$L_{шн.з} := L_{шн} + L_{шн.кр}$$

$$L_{шн.з} = 82.3 \text{ мм}$$

4. Визначаємо крок гвинтової нарізки  $t_{шн}$  :

$$t_{шн} := 0.7 \dots 1 \cdot D_{шн}$$

$$t_{шн} := 0.84 \cdot D_{шн}$$

$$t_{шн} = 6.72 \text{ мм}$$

Приймаємо  $t_{шн} := 6.75 \text{ мм}$

5. Визначаємо ширину гребеня  $e_{2.в.}$  :

$$e_{2.в.} := 0.06 \dots 0.15 \cdot D_{шн}$$

$$e_{2.в.} := 0.15 \cdot D_{шн}$$

$$e_{2.в.} = 1.2 \text{ мм}$$

6. Визначаємо радіальний зазор  $\delta_{ззз.}$  :

$$\delta_{ззз.} := 0.02 \dots 0.05 \cdot D_{шн}$$

$$\delta_{ззз.} := 0.025 \cdot D_{шн}$$

$$\delta_{ззз.} = 0.2 \text{ мм}$$

7. Визначаємо кут підйому гвинтової нарізки шнека  $\varphi_{зл.}$  :

$$\varphi_{зл.} := \text{atan} \left( \frac{t_{шн}}{\pi \cdot D_{шн}} \right)$$

$$\varphi_{зл.} = 15^\circ$$

8. Визначаємо глибину гвинтового каналу в зоні живлення  $h_{з.к.1}$  :

$$h_{з.к.1} := 0.12 \dots 0.32 \cdot D_{шн}$$

$$h_{з.к.1} := 0.3125 \cdot D_{шн}$$

$$h_{з.к.1} = 2.5 \text{ мм}$$

9. Визначаємо глибину гвинтового каналу в зоні дозування  $h_{з.к.3}$  :

$$h_{з.к.3} := 0.5 \cdot \left( D_{шн} - \sqrt{D_{шн}^2 - \left( \frac{4 \cdot h_{з.к.1}}{i} \right) \cdot (D_{шн} - h_{з.к.1})} \right)$$

$$h_{з.к.3} = 0.683 \text{ мм}$$

10. Визначаємо глибину гвинтового каналу в зоні пластифікації  $h_{з.к.2}$  :

$$h_{з.к.2} := h_{з.к.1} - \frac{h_{з.к.1} - h_{з.к.3}}{L_{шн}}$$

$$h_{з.к.2} = 2.472 \text{ мм}$$

11. Визначаємо довжину шнека до початку етапу стиснення матеріалу  $L_{шн.0}$  :

$$L_{н.ч.} := 0.4 \dots 0.5 \cdot L_{шн}$$

$$L_{н.ч.} := 0.45 \cdot L_{шн}$$

$$L_{шн.0} := L_{шн} - L_{н.ч.}$$

$$L_{шн.0} = 35.2 \text{ мм}$$

12. Визначаємо довжину зони живлення  $L_{з.ж.}$  :

$$L_{з.ж.} := 0.48 \dots 0.58 \cdot L_{шн}$$

$$L_{з.ж.} := 0.48 \cdot L_{шн}$$

$$L_{з.ж.} = 30.72 \text{ мм}$$

13. Визначаємо довжину зони пластифікації  $L_{з.п.}$  :

$$L_{з.п.} := 0.25 \dots 0.35 \cdot L_{шн}$$

$$L_{з.п.} := 0.27 \cdot L_{шн}$$

$$L_{з.п.} = 17.28 \text{ мм}$$

14. Визначаємо довжину зони дозування  $L_{з.д.}$  :

$$L_{з.д.} := 0.15 \dots 0.58 \cdot L_{шн}$$

$$L_{з.д.} := 0.25 \cdot L_{шн}$$

$$L_{з.д.} = 16 \text{ мм}$$

15. Визначаємо коефіцієнт опору циліндричного круглого каналу  $K_{оп.1}$  :

$$K_{оп.1} := \frac{\pi \cdot d_c^4}{128 \cdot L_{ц.к.1}}$$

$$K_{оп.1} = 0.02$$

16. Визначаємо коефіцієнт опору циліндричного круглого каналу  $K_{оп.2}$  :

$$K_{оп.2} := \frac{\pi \cdot d_{ц.к.2}^4}{128 \cdot L_{ц.к.2}}$$

$$K_{оп.2} = 0.102$$

17. Визначаємо коефіцієнт опору конічного круглого каналу  $K_{оп.2}$  :

$$K_{оп.3} := \frac{3 \cdot \pi \cdot d_{ц.к.3}^3 \cdot d_{ом.3}^3}{128 \cdot L_{ц.к.3} \cdot (d_{ц.к.3}^2 + d_{ц.к.3} \cdot d_{ом.3} + d_{ом.3}^2)}$$

$$K_{оп.3} = 0.028$$

18. Визначаємо коефіцієнт опору сопла  $K_{оп.с.}$

$$K_{оп.с.} := \frac{1}{\frac{1}{K_{оп.1}} + \frac{1}{K_{оп.2}} + \frac{1}{K_{оп.3}}}$$

$$K_{оп.с.} = 0.01$$

19. Визначаємо коефіцієнт  $\sigma_{з.н.}$  :

$$\sigma_{з.н.} := 1 - \frac{6.9 \cdot D_{шн}}{2 \cdot (h_{з.к.2} - h_{з.к.3})} \cdot \log \left( \frac{h_{з.к.2}}{h_{з.к.3}} \right) + \frac{D_{шн}^2}{2 \cdot h_{з.к.2} \cdot h_{з.к.3}}$$

$$\sigma_{з.н.} = 11.328$$

20. Визначаємо коефіцієнт  $a_{2,н}$ :

$$a_{2,н} := \frac{\pi^2}{h_{2,к,2} \cdot h_{2,к,3}} \cdot \left( \frac{D_{шн} \cdot (h_{2,к,2} + h_{2,к,3})}{2 \cdot h_{2,к,2} \cdot h_{2,к,3}} - 1 \right)$$

$$a_{2,н} = 37.816$$

21. Визначаємо коефіцієнт  $b_{2,н}$ :

$$d_{о,д} := D_{шн} - 2 \cdot h_{2,к,1}$$

$$d_{о,ж} := D_{шн} - 2 \cdot h_{2,к,3}$$

$$d_{о,д} = 3 \text{ мм}$$

$$d_{о,ж} = 6.633 \text{ мм}$$

$$b_{2,н} := \frac{2.3}{(h_{2,к,2} - h_{2,к,3}) \cdot D_{шн}^3} \cdot \log \left( \frac{h_{2,к,2} \cdot (D_{шн} + d_{о,д})}{h_{2,к,3} \cdot (D_{шн} + d_{о,ж})} \right) + \frac{2 \cdot h_{2,к,2} \cdot h_{2,к,3} + 2 \cdot D_{шн} \cdot (h_{2,к,2} + h_{2,к,3})}{2 \cdot D_{шн}^2 \cdot h_{2,к,2}^2 \cdot h_{2,к,3}^2}$$

$$b_{2,н} = 0.149$$

22. Визначаємо коефіцієнт  $A_{п,п}$ :

$$A_{п,п} := \frac{\pi^3 \cdot (t_{шн} - \lambda_{зох} \cdot \epsilon_{2,в}) \cdot \sigma_{2,н}}{a_{2,н} + t_{шн}^2 \cdot b_{2,н}}$$

$$A_{п,п} = 43.724$$

23. Визначаємо коефіцієнт  $B_{з,п}$ :

$$B_{з,п} := \frac{\pi \cdot t_{шн} \cdot (t_{шн} - \lambda_{зох} \cdot \epsilon_{2,в})}{12 \cdot L_{н,ч} \cdot (a_{2,н} + t_{шн}^2 \cdot b_{2,н})}$$

$$B_{з,п} = 0.008$$

24. Визначаємо коефіцієнт  $C_{е,п}$ :

$$C_{е,п} := \frac{\pi \cdot D_{шн} \cdot \delta_{зоз}^3 \cdot t_{шн}^2}{10 \cdot \epsilon_{2,в} \cdot L_{н,ч} \cdot \sqrt{\pi^2 \cdot D_{шн}^2 + t_{шн}^2}}$$

$$C_{е,п} = 0.001$$

25. Визначаємо об'ємну продуктивність екструдера  $Q_{шн,е}$  при частоті обертання  $n_{шн} := 3$  об/хв

$$Q_{шн,е} := \frac{A_{п,п} \cdot K_{оп,с}}{K_{оп,с} + B_{з,п} + C_{е,п}} \cdot n_{шн} \cdot k_{е,е}$$

$$Q_{шн,е} = 60.9977 \text{ мм}^3/\text{хв}$$

26. Визначаємо об'ємну продуктивність екструдера  $Q_{шн,е}$  при частоті обертання  $n_{шн} := 6$  об/хв

$$Q_{шн,е} := \frac{A_{п,п} \cdot K_{оп,с}}{K_{оп,с} + B_{з,п} + C_{е,п}} \cdot n_{шн} \cdot k_{е,е}$$

$$Q_{шн,е} = 121.9953 \text{ мм}^3/\text{хв}$$

27. Визначаємо об'ємну продуктивність екструдера  $Q_{\text{ш.е.}}$  при частоті обертання  $n_{\text{ш.}} := 9 \text{ об/хв}$

$$Q_{\text{ш.е.}} := \frac{A_{\text{н.п.}} \cdot K_{\text{оп.с.}}}{K_{\text{оп.с.}} + B_{\text{з.п.}} + C_{\text{е.п.}}} \cdot n_{\text{ш.}} \cdot k_{\text{е.е.}}$$

$$Q_{\text{ш.е.}} = 182.993 \text{ мм}^3 / \text{хв}$$

## РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ПРИВОДУ ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА ОБЛАДНАННЯ ТРИВИМІРНОГО ДРУКУ

$D_{\text{ш.}} := 0.008$	$e_{\text{с.е.}} := 0.0012$	$\rho_{\text{н.з.}} := 366$	$h_{\text{з.к.1}} := 0.0025$	$\varphi_{\text{з.л.}} := 15^\circ$
$t_{\text{ш.}} := 0.00675$	$\lambda_{\text{з.о.к.}} := 1$	$L_{\text{з.к.}} := 0.03072$	$h_{\text{з.к.2}} := 0.0025$	$L_{\text{з.д.}} := 0.016$
$\delta_{\text{з.о.з.}} := 0.0002$	$h_{\text{б.1}} := 0.0057$	$h_{\text{б.0}} := 0.012$	$h_{\text{б.2}} := 0.040$	$g := 9.81$
$n_{\text{ш.}} := 12$	$\theta := 6^\circ$	$f_{\omega} := 0.3$	$f_{\text{б}} := 0.7$	$f_{\text{с}} := 0.6$
$\alpha_{\text{б}} := 45^\circ$	$b_{\phi} := \alpha_{\text{б}}$	$D_{\delta} := 0.0335$	$h_{\text{з.к.}} := h_{\text{з.к.1}}$	$\eta_{\text{с.л.}} := 0.8$
$b_{\text{пр.}} := 0.001$	$K_{\text{y}} := 1$	$K_{\text{зГ}} := 1$	$K_{\text{зр}} := 1$	$K_{\delta} := 1$
$\eta_{\text{е.р.}} := 20000$				

1. Визначаємо швидкість  $V_{\text{с}}$ :

$$V_{\text{с}} := \pi \cdot D_{\text{ш.}} \cdot n_{\text{ш.}}$$

$$V_{\text{с}} = 0.302 \text{ м/с}$$

2. Визначаємо швидкість  $V_{\text{р}}$ :

$$V_{\text{р}} := V_{\text{с}} \cdot \frac{\sin(\theta)}{\sin(\theta + \varphi_{\text{з.л.}})}$$

$$V_{\text{р}} = 0.088 \text{ м/с}$$

3. Визначаємо  $W_{\text{к.ш.}}$ :

$$W_{\text{к.ш.}} := \left( \frac{t_{\text{ш.}}}{\lambda_{\text{з.о.к.}}} - b_{\text{пр.}} \right) \cdot \cos(\varphi_{\text{з.л.}})$$

$$W_{\text{к.ш.}} = 0.006$$

4. Визначаємо  $A_{\text{к}}$ :

$$A_{\text{к}} := \frac{(h_{\text{з.к.1}} - h_{\text{з.к.2}})}{L_{\text{з.к.}}}$$

$$A_{\text{к}} = 0$$

5. Визначаємо  $AF$ :

$$AF := \frac{K_{\text{y}} \cdot W_{\text{к.ш.}} \cdot (f_{\text{б}} \cdot \cos(\theta + \varphi_{\text{з.л.}}) - f_{\text{с}}) - h_{\text{з.к.}} \cdot f_{\text{с}} \cdot (K_{\text{зГ}} + K_{\text{зр}}) + A_{\text{к}} \cdot W_{\text{к.ш.}}}{h_{\text{з.к.}} \cdot W_{\text{к.ш.}}}$$

$$AF = -194.655$$

6. Визначаємо  $P_{з.з.}$ :

$$P_{з.з.} := \left( \frac{h_{\phi.1}}{h_{\phi.0}} \right)^{b_{\phi}} \cdot \frac{\rho_{н.з.} \cdot g \cdot D_{\delta}}{4 \cdot f_{\omega} \cdot K_{\delta}} \cdot \left( \left( 1 - \exp \left( \frac{4 \cdot f_{\omega} \cdot K_{\delta} \cdot h_{\phi.2}}{D_{\delta}} \right) \right) + \frac{\rho_{н.з.} \cdot g \cdot h_{\phi.1}}{b_{\phi} - 1} \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{h_{\phi.1}}{h_{\phi.0}} \right)^{b_{\phi} - 1} \right)$$

$$P_{з.з.} = 953.65$$

7. Визначаємо  $N_{пр.}$ :

$$N_{пр.} := \frac{(V_p \cdot f_b \cdot W_{к.ш.} + V_p \cdot f_s \cdot (W_{к.ш.} + 2 \cdot h_{з.к.})) + \frac{P_{з.з.}}{AF} \cdot \exp \left( \frac{AF \cdot L_{з.к.}}{\sin(\varphi_{з.л.})} - 1 \right)}{\eta_{с.л.}} + \frac{10^{-4} \cdot \pi^3 \cdot D_{шн} \cdot \varepsilon_{с.е.} \cdot L_{з.д.} \cdot \eta_{с.р.} \cdot n_{ш.}^2}{36 \cdot \delta_{зос.} \cdot t_{шн}} \cdot \eta_{с.л.}$$

$$N_{пр.} = 35.279 \text{ Вт}$$

ДОДАТОК К.  
3D-ПРИНТЕР ANYCUBIC MEGA S ТА ЙОГО ТЕХНІЧНІ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ



Рисунок К.1 – Загальний вигляд 3D принтера Anycubic Mega S

Таблиця К.1

Технічні характеристики 3D принтера Anycubic Mega S

№	Параметр	Величина
1	Технологія друку	FDM
2	Кількість екструдерів	1
3	Тип екструдера	Короткий екструдер Titan
4	Кількість сопел	1
5	Область друку, мм	210x210x205
6	Швидкість друку, мм/с	20-100
7	Діаметр сопла (мм)	0.4
8	Товщина шару, мкм	50-300
9	Точність позиціонування, мм:	X/Y 0.0125; Z 0.002
10	Діаметр пластикової нитки	1.75
11	Максимальна температура друку, °C	260
12	Наявність столу, що підігрівається	Так
13	Максимальна температура столу, °C	110
14	Основний матеріал	TPU, PLA, ABS, HIPS та інші
15	Робота в мережах	110V/220V AC, 50-60Hz, 12V DC
16	Максимальна споживана потужність, Вт	100–240
17	Софт (Slice)	Cura, Simplify3D, Repetier- HOST
18	Типи файлів	.STL, .OBJ, .DAE, .AMF.
19	Операційна система	WindowsXP, Win7, Win8, Win 10, Linux, Mac OS
20	Вага, кг	11
21	Габарити, мм	405x410x453



ДОДАТОК Л.  
ЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУР В ТОЧКАХ ВИМІРЮВАННЯ ПРИ  
МОДЕЛЮВАННІ В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ SOLIDWORKS  
SIMULATION

Таблиця Л.1

Температури в місцях вимірювання при моделюванні в програмному середовищі SolidWorks Simulation та при двох способах вимірювання без обдуву повітрям охолоджуючих ребер (прокладка фторопласт)

№ п/п	Спосіб визначення температури	Температура, °С					
		Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6
1	Моделювання в програмному середовищі SolidWorks Simulation	227,47	235,4	124,06	84,7	83,58*	75,6*
2	За допомогою вимірювальної системи	-	232,5	124,3	92,0	68,0	60,0
3	З використанням тепловізійної камери	213,9	156,7**	118,4	88,9	27,8***	60,9

\* - значення температури розраховані без наявності теплового бар'єру (прокладки); \*\* - значення температури визначене на поверхні теплоізоляції нагрівального елемента; \*\*\* - значення температури визначене з похибкою через наявність полімеру в бункері

Таблиця Л.2

Температури в місцях вимірювання при моделюванні в програмному середовищі SolidWorks Simulation та при двох способах вимірювання без обдуву повітрям охолоджуючих ребер (прокладка флубон)

№ п/п	Спосіб визначення температури	Температура, °С					
		Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6
1	Моделювання в програмному середовищі SolidWorks Simulation	227,5	235,23	123,8	84,0	-	-
2	За допомогою вимірювальної системи	-	231	126,5	92	69	52
3	З використанням тепловізійної камери	219,7	151,4**	125,6	90,7	31,5***	51,5

\*\* - значення температури визначене на поверхні теплоізоляції нагрівального елемента; \*\*\* - значення температури визначене з похибкою через наявність полімеру в бункері

Таблиця Л.3

Температури в місцях вимірювання при моделюванні в програмному середовищі SolidWorks Simulation та при двох способах вимірювання з обдувом охолоджуючих ребер і полімеру в завантажувальному бункері та наявністю фторопластової прокладки

№ п/п	Спосіб визначення температури	Температура, °С					
		Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6
1	Моделювання в програмному середовищі SolidWorks Simulation	217,71	209,19	82,06	53,2	40,65	38,29
2	За допомогою вимірювальної системи	-	232,5	73,5	53,1	48,1	35
3	З використанням тепловізійної камери	198,1	149,3**	70,6	51,5	32,8***	34,6

\*\* - значення температури визначене на поверхні теплоізоляції нагрівального елемента; \*\*\* - значення температури визначене з похибкою через наявність полімеру в бункері

Таблиця Л.4

Температури в місцях вимірювання при моделюванні в програмному середовищі SolidWorks Simulation та при двох способах вимірювання з обдувом охолоджуючих ребер і полімеру в завантажувальному бункері та наявністю флуоронової прокладки

№ п/п	Спосіб визначення температури	Температура, °С					
		Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6
1	Моделювання в програмному середовищі SolidWorks Simulation	222,41	216,33	84,76	56,16	40,86	40,05
2	За допомогою вимірювальної системи	-	230,5	75,1	52,5	45	33,2
3	З використанням тепловізійної камери	219,7	151,4**	71,0	51,5	32,3***	34,6

\*\* - значення температури визначене на поверхні теплоізоляції нагрівального елемента; \*\*\* - значення температури визначене з похибкою через наявність полімеру в бункері

## ДОДАТОК М.

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ ПО ВИЗНАЧЕННЮ НАСИПНОЇ ГУСТИНИ  
ПОДРІБНЕНИХ ЧАСТОК ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

Таблиця М.1

## Результати експерименту для ABS пластику

№	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3	Y <sub>сер.</sub>
1	1	0	0	389,24	392,3	392,27	391,27
2	0	1	0	371,4	370,6	370,4	370,80
3	0	0	1	366,9	365,7	366,42	366,44
4	0,33	0,33	0,33	376,2	376,0	378,2	376,80
5	0,33	0,66	0	371,3	371,9	371,48	371,56
6	0	0,33	0,66	362,9	363,0	363,43	363,11
7	0,66	0,33	0	369,1	369,0	368,57	368,89
8	0,33	0	0,66	367,5	367,9	367,94	367,78
9	0,66	0	0,33	373,2	373,6	373,88	373,56
10	0	0,66	0,33	369,4	369,0	368,93	369,11

Таблиця М.2

## Результати експерименту для PLA пластику

№	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3	Y <sub>сер.</sub>
1	1	0	0	333,1	333,4	333,49	333,33
2	0	1	0	294,7	294,92	294,84	294,82
3	0	0	1	308,91	308,87	308,68	308,82
4	0,33	0,33	0,33	305,0	305,2	305,13	305,11
5	0,33	0,66	0	292,45	292,5	292,37	292,44
6	0	0,33	0,66	300,22	300,3	300,14	300,22
7	0,66	0,33	0	302,5	302,2	302,62	302,44
8	0,33	0	0,66	306,5	306,65	306,86	306,67
9	0,66	0	0,33	307,9	308,0	307,44	307,78
10	0	0,66	0,33	296,3	296,0	296,36	296,22

## Результати експерименту для TPU пластику

№	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3	Yср.
1	1	0	0	340,4	340,1	339,5	340,0
2	0	1	0	299,7	300,1	300,2	300,0
3	0	0	1	286,6	286,7	287,01	286,77
4	0,33	0,33	0,33	300,64	300,7	300,67	300,67
5	0,33	0,66	0	313,4	313,5	313,09	313,33
6	0	0,33	0,66	286,7	286,8	286,51	286,67
7	0,66	0,33	0	306,5	306,7	306,81	306,67
8	0,33	0	0,66	300,1	300,2	299,7	300,0
9	0,66	0	0,33	319,8	320,2	320	320,0
10	0	0,6	0,33	293,1	293,4	293,49	293,33



Рисунок М1 – Мононітка, надрукована з подрібнених часток ABS пластику на 3D-принтері з шнековим екструдером

ДОДАТОК Н.  
ДАНІ ДЛЯ ПОБУДОВИ РІВНЯНЬ РЕГРЕСІЙ

Таблиця Н.1

Матриця некомпозиційного плану другого порядку для трьох факторів  
(вибірка з плану типу  $3^k$ )

Номер досліджу	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_{12}$	$x_{22}$	$x_{32}$	$y$
1	+1	+1	+1	0	+1	0	0	+1	+1	0	$y_1$
2	+1	+1	-1	0	-1	0	0	+1	+1	0	$y_2$
3	+1	-1	+1	0	-1	0	0	+1	+1	0	$y_3$
4	+1	-1	-1	0	+1	0	0	+1	+1	0	$y_4$
5	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$y_5$
6	+1	+1	0	+1	0	+1	0	+1	0	+1	$y_6$
7	+1	+1	0	-1	0	-1	0	+1	0	+1	$y_7$
8	+1	-1	0	+1	0	-1	0	+1	0	+1	$y_8$
9	+1	-1	0	-1	0	+1	0	+1	0	+1	$y_9$
10	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$y_{10}$
11	+1	0	+1	+1	0	0	+1	0	+1	+1	$y_{11}$
12	+1	0	+1	-1	0	0	-1	0	+1	+1	$y_{12}$
13	+1	0	-1	+1	0	0	-1	0	+1	+1	$y_{13}$
14	+1	0	-1	-1	0	0	+1	0	+1	+1	$y_{14}$
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$y_{15}$

Таблиця Н.2

Матриця плану

X1	X2	X3	Y
1,0	1,0	0,0	188,66628
1,0	-1,0	0,0	67,77125
-1,0	1,0	0,0	155,1474
-1,0	-1,0	0,0	55,92717
0,0	0,0	0,0	112,098
1,0	0,0	1,0	124,3597
1,0	0,0	-1,0	116,93862
-1,0	0,0	1,0	98,480446
-1,0	0,0	-1,0	124,81123
0,0	0,0	0,0	106,991
0,0	1,0	1,0	178,038
0,0	1,0	-1,0	157,27867
0,0	-1,0	1,0	64,8567
0,0	-1,0	-1,0	43,2378
0,0	0,0	0,0	106,285

Таблиця Н.3

Коефіцієнти рівняння регресії, отримані за допомогою програми  
«Optimization Model&Planning Experiment»

Коефіцієнти рівняння регресії	Значення коефіцієнтів рівняння регресії
$b_{13}$	8,437967300415039
$b_{12}$	5,418699264526367
$b_{11}$	6,857366561889648
$b_{33}$	0,8321342468261719
$b_{23}$	-0,21489334106445312
$b_3$	2,9335641860961914
$b_{22}$	1,5626564025878906
$b_2$	55,9171781539917
$b_1$	7,921199798583984
$b_0$	108,45800018310547

Таблиця Н.4

Дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії

Дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії	Значення дисперсій коефіцієнтів рівняння регресії
$S_{b_{13}}^2$	2,5154508566920413
$S_{b_{12}}^2$	1,2577254283460206
$S_{b_{11}}^2$	2,7250717614163777
$S_{b_0}^2$	3,3539344755893885

Таблиця Н.5.

Додаткова таблиця для розрахунку  $S_y^2$

№ дослідів в центрі плану експериментальні значення по трьох дослідів в центрі	Середньо-арифметичне експериментальне значення по трьох дослідів в центрі плану $Y_e$	Різниця експериментальних та середньоарифметичного значення по трьох дослідів в центрі плану $Y_e - \bar{Y}_e$	Різниця квадратів експериментальних та середньоарифметичного значення по трьох дослідів в центрі плану $(Y_e - \bar{Y}_e)^2$
5	112,098	3,640	13,2496
10	106,991	-1,467	2,1521
15	106,285	-2,173	4,7219
5			
108,458			
$S_y^2 = \frac{S_E}{n_0 - 1} = \frac{20,1236}{3 - 1} = 10,0618$			$S_E = \sum (Y_e - \bar{Y}_e)^2 = 20,1236$

Таблиця Н.6

## Матриця значень

№	x1	x2	x3	$Y_e$	$Y_p$	$Y_e - Y_p$	$(Y_e - Y_p)^2$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2,5	9,0	240	188,66628	186,1351004	2,531179635	6,406870346
2	2,5	3,0	240	67,77125	63,46334553	4,307904472	18,55804094
3	1,5	9,0	240	155,1474	159,4553022	-4,307902238	18,5580217
4	1,5	3,0	240	55,92717	58,45834446	-2,53117446	6,406844145
5	2,0	6,0	240	112,098	108,4580002	3,639999817	13,24959867
6	2,5	6,0	250	124,3597	135,4402323	-11,08053228	122,7781955
7	2,5	6,0	230	116,93862	112,6971693	4,241450696	17,98990401
8	1,5	6,0	250	98,480446	102,7218981	-4,241452079	17,98991574
9	1,5	6,0	230	124,81123	113,7307043	11,08052569	122,7780496
10	2,0	6,0	240	106,991	108,4580002	-1,467000183	2,152089537
11	2,0	9,0	250	178,038	169,4886398	8,549360168	73,09155929
12	2,0	9,0	230	157,27867	164,0512981	-6,772628141	45,86849194
13	2,0	3,0	250	64,8567	58,08407021	6,772629794	45,86851433
14	2,0	3,0	230	43,2378	51,78715515	-8,549355151	73,0914735
15	2,0	6,0	240	106,285	108,4580002	-2,173000183	4,721929796
							$S_R = \sum (Y_e - Y_p)^2 = 589,510$

Таблиця Н.7

## Значення рівнів та інтервалів варіювання факторів

Найменування та позначення факторів	Рівні варіювання			Інтервали варіювання
	Нижній рівень -1	Основний рівень 0	Верхній рівень +1	
Діаметр часток пластику TPU $d_{ч}$ , мм ( $x_1$ )	1,5	2,0	2,5	0,5
Частота обертання шнека, $n_{шн.}$ , об/хв ( $x_2$ )	3,0	6,0	9,0	3,0
Температура нагрівання екструдера $t_{нагр.}$ , °C ( $x_3$ )	220	230	240	10

Таблиця Н.8

Матриця некомпозитивного плану другого порядку для трьох факторів (вибірка з плану типу  $3^k$ )

Номер досліджу	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_{12}$	$x_{22}$	$x_{32}$	$y$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	+1	+1	+1	0	+1	0	0	+1	+1	0	$y_1$
2	+1	+1	-1	0	-1	0	0	+1	+1	0	$y_2$
3	+1	-1	+1	0	-1	0	0	+1	+1	0	$y_3$
4	+1	-1	-1	0	+1	0	0	+1	+1	0	$y_4$
5	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$y_5$
6	+1	+1	0	+1	0	+1	0	+1	0	+1	$y_6$

Продовження таблиці Н.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7	+1	+1	0	-1	0	-1	0	+1	0	+1	$y_7$
8	+1	-1	0	+1	0	-1	0	+1	0	+1	$y_8$
9	+1	-1	0	-1	0	+1	0	+1	0	+1	$y_9$
10	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$y_{10}$
11	+1	0	+1	+1	0	0	+1	0	+1	+1	$y_{11}$
12	+1	0	+1	-1	0	0	-1	0	+1	+1	$y_{12}$
13	+1	0	-1	+1	0	0	-1	0	+1	+1	$y_{13}$
14	+1	0	-1	-1	0	0	+1	0	+1	+1	$y_{14}$
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$y_{15}$

Таблиця Н.9

Матриця плану

X1	X2	X3	Y
1,0	1,0	0,0	100,009
1,0	-1,0	0,0	29,39
-1,0	1,0	0,0	30,48
-1,0	-1,0	0,0	8,946
0,0	0,0	0,0	24,51
1,0	0,0	1,0	37,994
1,0	0,0	-1,0	43,728
-1,0	0,0	1,0	10,704
-1,0	0,0	-1,0	21,616
0,0	0,0	0,0	23,29
0,0	1,0	1,0	42,05
0,0	1,0	-1,0	44,14
0,0	-1,0	1,0	9,417
0,0	-1,0	-1,0	14,298
0,0	0,0	0,0	27,98

Таблиця Н.10

Коефіцієнти рівняння регресії, отримані за допомогою програми  
«Optimization Model&Planning Experiment»

Коефіцієнти рівняння регресії	Значення коефіцієнтів рівняння регресії
1	2
$b_{13}$	1,294499397277832
$b_{12}$	12,27125096321106
$b_{11}$	8,99025022983551
$b_{33}$	-5,739750504493713
$b_{23}$	0,6977500915527344



Продовження таблиці Н.10

1	2
$b_3$	-2,952125072479248
$b_{22}$	7,955999970436096
$b_2$	19,328500151634216
$b_1$	17,42187535762787
$b_0$	25,260000228881836

Таблиця Н.11

## Дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії

Дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії	Значення дисперсій коефіцієнтів рівняння регресії
$S_{bil}^2$	1,48022419490826
$S_{bi}^2$	0,74011209745413
$S_{bii}^2$	1,6035762111506149
$S_{b0}^2$	1,9736322598776799

Таблиця Н.12

Додаткова таблиця для розрахунку  $S_y^2$ 

№ дослідів в центрі плану експериментальні значення по трьох дослідках в центрі	Середньо-арифметичне експериментальне значення по трьох дослідках в центрі плану $Y_e$	Різниця експериментальних та середньоарифметичного значення по трьох дослідках в центрі плану $Y_e - Y_e$	Різниця квадратів експериментальних та середньоарифметичного значення по трьох дослідках в центрі плану $(Y_e - Y_e)^2$
5	24,51	-0,75	0,5625
10	23,29	-1,97	3,8809
15	27,98	2,72	7,3984
$S_y^2 = \frac{S_E}{n_0 - 1} = \frac{11,8418}{3 - 1} = 5,9209$			$S_E = \sum (Y_e - \bar{Y}_e)^2 = 11,8418$

Таблиця Н.13

## Матриця значень

№ п/п	x1	x2	x3	$Y_e$	$Y_p$	$Y_e - Y_p$	$(Y_e - Y_p)^2$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2,5	9,0	230	100,009	91,2278769	8,781123098	77,10812287
2	2,5	3,0	230	29,39	28,02837467	1,361625328	1,854023534
3	1,5	9,0	230	30,48	31,84162426	-1,36162426	1,854020625
4	1,5	3,0	230	8,946	17,72712588	-8,781125883	77,10817177
5	2,0	6,0	230	24,51	25,26000023	-0,750000229	0,562500343
6	2,5	6,0	240	37,994	44,27474964	-6,280749637	39,447816
7	2,5	6,0	220	43,728	47,59000099	-3,862000987	14,91505162

## Продовження таблиці Н.13

1	2	3	4	5	6	7	8
8	1,5	6,0	240	10,704	6,842000127	3,861999873	14,91504302
9	1,5	6,0	220	21,616	15,33524907	6,280750934	39,44783229
10	2,0	6,0	230	23,29	25,26000023	-1,970000229	3,880900902
11	2,0	9,0	240	42,05	44,55037487	-2,500374866	6,251874468
12	2,0	9,0	220	44,14	49,05912483	-4,919124827	24,19778907
13	2,0	3,0	240	9,417	4,497874379	4,919125621	24,19779687
14	2,0	3,0	220	14,298	11,79762471	2,500375293	6,251876605
15	2,0	6,0	230	27,98	25,26000023	2,719999771	7,398398755
							$S_R = \sum (Y_e - Y_p)^2 = 339,3912$

ДОДАТОК П.  
ВИМІРЮВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ



Рисунок П.1 – Загальний вигляд цифрового електронного штангенциркуля

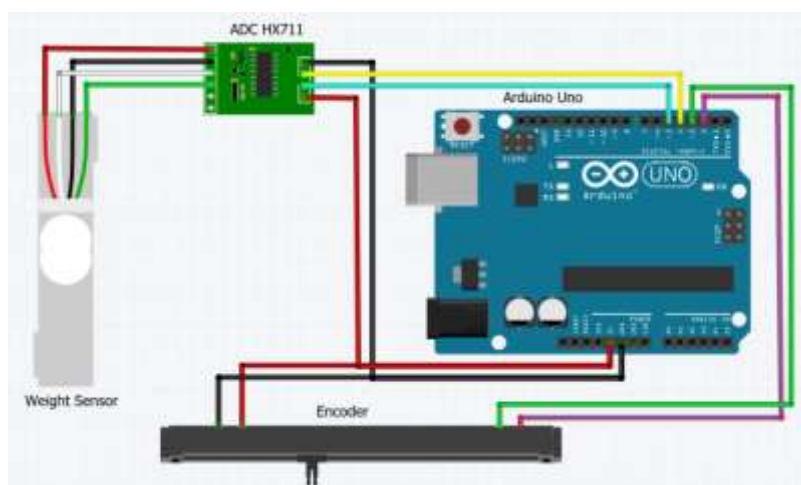


Рисунок П.2 – Схема під'єднання датчиків до плати Arduino Uno



Рисунок П.3 – Інтерфейс програмного забезпечення вимірювання даних  
зусилля розриву та видовження надрукованих полімерних зразків

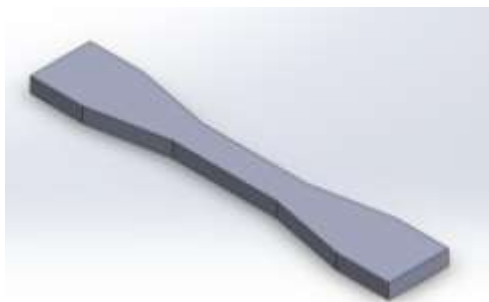


Рисунок П.4 – Комп'ютерна 3D модель лопатки з ABS пластику

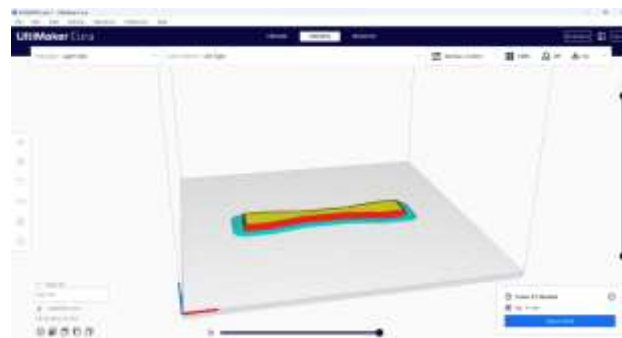


Рисунок П.5 – Пошарова розбивка лопатки з ABS пластику

Таблиця П.1

Параметри друку тестових зразків, виготовлених з філаментів ABS та TPU

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

Таблиця П.2

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

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

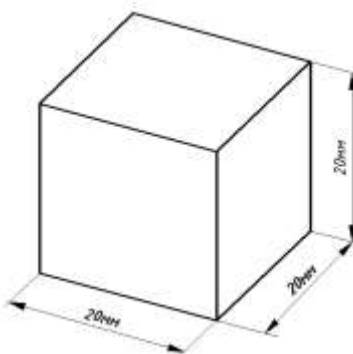


Рисунок П.6 - Форма і розмір тестового зразка



а



б

Рисунок П.7 – Вимірювання надрукованих зразків за допомогою цифрового штангенциркуля: а – ABS (подрібнені відходи); б – TPU (подрібнені відходи)



Рисунок П.8 - Схема вимірювання розмірів тестового зразка у вигляді куба

Таблиця П.3

Результати вимірювання розмірів тестових зразків із 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

Таблиця П.4

Результати вимірювання розмірів тестових зразків із 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

Таблиця П.5

Результати вимірювання розмірів тестових зразків із PET пластику

Матеріал	Вісь вимірювання	Середнє значення величини розміру, мм			Середнє значення, мм	Відхилення, мм
		Вимір 1	Вимір 2	Вимір 3		
PET, 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