

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ОЛЕКСИШЕН ВІТАЛІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 66.08:678.5

ДИСЕРТАЦІЯ

**ВДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ПОЛІМЕРНИХ
ВИРОБІВ МЕТОДОМ ПРОСТОРОВОГО ДРУКУ**

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

_____ В.О.Олексишен

Науковий керівник Колосов Олександр Євгенович, доктор технічних наук,
професор, старший науковий співробітник

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Олексишен В. О. Вдосконалення обладнання для одержання полімерних виробів методом просторового друку. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2020.

Дисертаційну роботу присвячено дослідженню процесу просторового друку, а саме впливу основних технологічних параметрів на величину міжшарової адгезії та локальну деформацію нанесеного термопластичного полімерного матеріалу в процесі охолодження, а також вивченню динаміки переміщення виконавчих органів FDM 3D принтерів в залежності від типу конструктивної схеми.

Проведено аналітичний огляд сучасного стану досліджень технології просторового друку. Розглянуто основні сучасні технології адитивного виробництва, систематизовано конструкції устаткування 3D друку термопластичними полімерними матеріалами в залежності від кінематичної схеми переміщення виконавчих органів, розглянуто типи конструкцій друкувальних головок на основі патентного пошуку, проаналізовано дослідження фізико-механічних характеристик друкованих виробів в залежності від основних параметрів 3D друку та геометрії нанесення шарів.

Проведений огляд показав, що галузь сучасного адитивного обладнання для одержання полімерних виробів надзвичайно швидко розвивається, проте підходи до конструювання нових типів обладнання не враховують властивостей витратного матеріалу. Головним завданням інженерів під час проектування є оптимізація та модернізація існуючих конструкцій. Також недостатньо вивченим є питання процесу формування готових виробів. Проведені дослідження механічних властивостей зразків не дають точних даних про величину та природу міжшарової адгезії, яка є основою адитивних технологій. Навіть в

дослідженнях, що проводили випробовування на статичний одноосьовий розтяг в поперечному напрямку до нанесення шарів, була присутня контурна стінка, а це, в свою чергу, є некоректним для встановлення величини міжшарової адгезії.

Варто зазначити, що практично не вивченим є питання поведінки розплаву термопластичного матеріалу після його виходу з друкувальної головки, а саме процес його охолодження та взаємодії з попередньо нанесеним матеріалом. Окремою прикладною темою, що також слабо вивчена, є питання динаміки руху виконавчих органів та продуктивності обладнання в залежності від конструктивної схеми.

Для моделювання процесу охолодження в роботі використано двовимірну математичну модель нестационарної теплопровідності та модель течії неньютонівської неізотермічної рідини. Для моделювання деформування шару полімеру під дією власної ваги з одночасним охолодженням після нанесення на попередній шар розв'язувалась зв'язана термомеханічна задача з урахуванням ступеневої залежності в'язкості полімеру від швидкості деформації та законом Арреніуса залежності в'язкості від температури.

Отримані результати показали, що за умов інтенсивного обдуву полімер менш ніж за 1 с встигає охолотитись до температур, нижчих за температуру текучості без помітних деформацій. Проте для недопущення короблення та розшарування виробів температура не має виходити за певні межі, що свідчить про те, що повинен бути встановлений певний мінімальний проміжок часу до нанесення наступного шару, різний для різних полімерів і розмірів шару. Це накладає обмеження на допустиму швидкість роботи 3D-принтера.

Моделювання дає змогу отримати дані про ступінь заповнення поперечного перерізу виробів, встановити причини появи дефектів та підібрати оптимальні товщини, температури та швидкості друку.

Для моделювання процесу розтягу друкованих зразків в поперечному до напрямку нанесення шарів застосовано дискретну математичну модель з використанням граничного елемента на основі методу штрафу для прогнозування деламінації нанесених шарів полімеру.

Отримані результати показали, що розшарування відбувається починаючи з країв поверхні контакту шарів за схемою крихкого руйнування.

Наведені модель та методика числового моделювання дають змогу прогнозувати міцність друкованих полімерних виробів в напрямі поперек шарів з урахуванням експериментальних даних випробувань друкованих зразків на розтяг.

Було проведено відповідні експериментальні дослідження друкованих зразків на розтяг в залежності від геометрії та технологічних параметрів 3D друку таких, як температура та швидкість друку, а також висота та довжина нанесеного шару.

Вдосконалено методику проведення відповідних досліджень та створено експериментальну установку для їх проведення, що включає механічну та електронну частини, а також створено програмне забезпечення для обробки даних. Створена установка та відповідні методики використовуються в навчальному процесі під час виконання лабораторних робіт, курсового й дипломного проектування на кафедрі хімічного, полімерного та силікатного машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Група експериментальних досліджень зразків на розтяг дала змогу встановити ряд залежностей величини міжшарової адгезії від температури та швидкості друкувальної головки, а також товщини нанесеного шару.

1. Виявлено, що існує оптимальний діапазон температур ($t_{\text{друку}} = 210...220^{\circ}\text{C}$), при якому значення міжшарової адгезії досягає максимальних значень. При температурах менших, наплавлення є достатньо слабким, а при вищих – відбувається рекристалізація полімеру, що негативно впливає на взаємодію між шарами.

2. Встановлено, що при низьких швидкостях ($V_{\text{друку}} \leq 20 \text{ мм/с}$) переміщення друкувальної головки величина міжшарової взаємодії на 8-10% нижче, ніж при оптимальних ($V_{\text{друку опт.}} = 30...40 \text{ мм/с}$), внаслідок локального перегріву шару термопластичного полімеру; при швидкостях $V_{\text{друку}} > 50 \text{ мм/с}$

поступово відбувається зрив нанесеного шару і якість зразків поступово падає. Очевидно, що швидкість друку в першу чергу впливає на час між нанесенням двох сусідніх шарів, тому найвища міцність зразків відповідає тому випадку, коли наступний шар наноситься на стабільний в геометрії, проте ще максимально гарячий шар термопластичного полімерного матеріалу.

3. Величина міжшарової взаємодії практично незмінна для зразків з товщиною шару $\Delta_{шару} \leq 1/3d_{сопла}$, зі зростанням товщини міцність падає і при критичних значеннях ($\Delta_{шару} > 1/2d_{сопла}$) 3D друк стає неможливим. Отже з точки зору продуктивності товщин шару $\Delta_{шару} = 0,05 \dots 0,1d_{сопла}$ є нераціональними і не впливають на міцність виробів.

Також була виявлена закономірність появи дефектних зразків, міцність яких була меншою на 30 – 80% за міцність інших зразків відповідної групи. При збільшенні величини поперечного перерізу на 50% кількість таких зразків поступово падала. Це пов'язано з рядом факторів, а саме недоекструзією полімерної сировини на початку побудови нового шару, деформацією поперечного перерізу шару під час охолодження, захопленні повітря нанесеною полімерною ниткою, а також вібраціями робочої платформи та друкувальної головки, що утворюють мікропорожнини на межі двох шарів. Зі зростанням площі поперечного перерізу, питомий об'єм та вірогідність появи критичних дефектів зменшується, а отже і міцнісні та якісні характеристики зразків зростають.

Група дослідів по вивченню динаміки руху виконавчих органів, в першу чергу друкувальної головки 3D принтера в залежності від типу конструкції, дала змогу дослідити процес нанесення термопластичного полімерного витратного матеріалу, отримати данні щодо фактичної швидкості руху в кожній точці шару, виявити місця зупинки та прискорення. Було виявлено, що швидкість друку завжди менша (до 50%) за задану в виконавчій програмі і залежить від схеми переміщення друкувальної головки. Також встановлено, що зі зростанням швидкості друку відмінність між фактичним та теоретичним часом друку поступово зменшується та залежність між ними описується степеневим законом, при чому для всіх типів конструкцій.

Була запропонована методика по оцінці точності виготовлення тонкостінних крупногабаритних форм на основі знаходження поля відхилень між 3D полігональним скануванням об'єкта та базовою твердотільною формою, а також встановлена залежність між відхиленням форми та інтенсивністю охолодження. Дослідження показало оптимальні значення режимів охолодження. При достатньо слабких значеннях відбувається надмірна деформація перерізу нанесеного матеріалу, а при критично високих, полімер показує високу усадку, що також негативно впливає на точність виготовлення.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у комплексному дослідженні процесу формування полімерних виробів створених методом 3D друку, а саме величини, геометрії, природи міжшарової адгезії та деформації гарячого шару термопластичного полімерного матеріалу; створені методів розробки і вдосконалення процесу та обладнання FDM друку в напрямку підвищення ізотропності характеристик кінцевого виробу.

Науково-технічні результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», а також у ТОВ «ТУКАНА ІНЖИНІРИНГ УКРАЇНА» (м. Київ, Київська обл.), що підтверджено актами впровадження.

Ключові слова: 3D друк, 3D принтер, FDM, адитивна технологія, міжшарова адгезія, полімер, температура друку, швидкість друку.

ABSTRACT

Oleksyshen V.O. Improvement of equipment for producing polymer products by spatial printing.– Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

A thesis for obtaining a scientific degree of a Ph.D on specialty 133 – “Industrial Machinery Engineering”. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to the study of the spatial printing process, namely, the impact of the main technological parameters on the value of interlayer adhesion and local deformation of the applied thermoplastic polymer material during the cooling process, as well as the study of the dynamics of movement of the executive parts of FDM 3D printers, depending on the type of design scheme.

An analytical review of the current state of research on spatial printing technology is carried out. The main modern technologies of additive manufacturing are considered, the designs of 3D printing equipment with thermoplastic polymeric materials are systematized depending on the kinematic scheme of movement of the executive bodies, the types of designs of printheads based on patent searches are considered, studies of the physical and mechanical characteristics of printed products are analyzed depending on the main parameters of 3D printing and the geometry of the layers.

The review showed that the industry of modern additive equipment for the production of polymer products is developing extremely rapidly, however, approaches to the design of new types of equipment do not take into account the properties of consumables. The main design task for engineers is to optimize and modernize existing structures. Also insufficiently studied is the issue of the process of forming finished products. The conducted studies of the mechanical properties of samples do not provide accurate data on the magnitude and nature of interlayer adhesion, which is the basis of additive technologies. Even in the studies, static uniaxial tensile tests were carried out in the transverse direction of the application of the layers, a contour wall was present, and this, in turn, is incorrect for establishing the value of interlayer adhesion.

It should be noted that the question of the behavior of the melt of thermoplastic material after it leaves the print head, and the very process of its cooling and interaction with the previously applied material, has practically not been studied. A separate applied topic, also poorly studied, is the issue of the dynamics of motion of the executive bodies and the performance of equipment, depending on the design scheme.

To simulate the cooling process, a two-dimensional mathematical model of unsteady thermal conductivity and a model of the flow of a non-Newtonian non-isothermal fluid are used. To simulate the deformation of the polymer layer under its own weight with simultaneous cooling after deposition on the previous layer, a related thermomechanical problem was solved taking into account the power-law dependence of the polymer viscosity on the strain rate and the Arrhenius law of the temperature dependence of viscosity.

The results obtained showed that, under conditions of intensive blowing, the polymer in less than 1 s has time to cool to a temperature below the pour point without noticeable deformations. However, to prevent warping and delamination of products, the temperature should not go beyond certain limits, which indicates that a certain minimum period of time must be established before applying the next layer, it is different for different polymers and layer sizes. This imposes restrictions on the allowable speed of the 3D printer.

Modeling allows to obtain data on the degree of filling the cross-section of products, establish the causes of defects and select the optimal thickness, temperature and printing speed.

To simulate the process of stretching printed samples in the transverse to the direction of application of layers, a discrete mathematical model was applied using a limiting element based on the penalty method to predict the delamination of deposited polymer layers.

The results obtained showed that delamination occurs starting from the edges of the contact surface of the layers according to the brittle fracture scheme.

The presented model and method of numerical simulation make it possible to predict the strength of printed polymer products in the direction across the layers based on experimental data of tensile tests of printed samples.

Corresponding experimental studies of printed samples for rupture were carried out depending on the geometry and technological parameters of 3D printing, such as temperature and printing speed, as well as the height and length of the applied layer.

The methodology for carrying out the relevant studies has been improved and an experimental setup has been created for their carrying out, including mechanical and electronic parts, and software for data processing has been created. The created installation and the corresponding methods are used in the educational process when performing laboratory work, coursework and diploma design at the Department of Chemical, Polymer and Silicate Engineering of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

A group of experimental tensile studies of samples allowed to establish a number of dependences of the value of interlayer adhesion on the temperature and speed of the print head, as well as the thickness of the applied layer.

1. It was revealed that there is an optimal temperature range ($t_{print} = 210... 220^{\circ}\text{C}$), at which the value of interlayer adhesion reaches its maximum values. At lower temperatures, surfacing is rather weak, and at high temperatures, polymer recrystallization occurs, which negatively affects the interaction between the layers.

2. It was found that at low speeds of movement of the print head ($V_{print} \leq 20 \text{ mm/s}$) the value of interlayer interaction is slightly lower than at optimal ($V_{print} = 30...40 \text{ mm/s}$), due to local overheating of the thermoplastic polymer; at printing speeds $V_{print} \geq 50 \text{ mm/s}$, the applied layer gradually breaks off and the quality of the samples gradually decreases. Obviously, the print speed primarily affects the time between the application of two adjacent layers, therefore the highest strength of the samples corresponds to the case when the next layer is applied on a geometry-stable but still very hot layer of thermoplastic polymer material.

3. The size of the interlayer interaction is practically unchanged for samples with a layer thickness of $\Delta_{layer} \leq 1/3 d_{nozzle}$. With increasing thickness, the strength decreases and at critical values ($\Delta_{layer} > 1/2 d_{nozzle}$) 3D printing becomes impossible. So from the point of view of the productivity of layer thicknesses $\Delta_{layer} = 0,05 \dots 0,1 d_{nozzles}$ are irrational and do not affect the strength of the products.

Also, a regularity was found for the appearance of defective samples, the strength of which was lower by 30 - 80% of the strength of other samples of the corresponding group. With an increase in the cross-sectional value by 50%, the number of such samples gradually decreased. This is due to a number of factors, namely underextrusion of the polymer raw material at the beginning of the construction of a new layer, deformation of the layer cross-section during cooling, air entrapment by the applied polymer thread, as well as vibrations of the working platform and the print head, form microcavities at the boundary of two layers. With an increase in the cross-sectional area, the specific volume and the probability of the appearance of critical defects decrease, and, consequently, the strength and quality characteristics of the samples increase.

A group of experiments to study the dynamics of motion of the executive bodies, primarily the print head of a 3D printer, depending on the type of design, made it possible to study the process of applying a thermoplastic polymer consumable, obtain data on the actual speed of movement at each point of the layer, and identify places of stopping and acceleration. It was found that the print speed is always slightly slower than the one specified in the executive program and is different depending on the pattern of movement of the print head. It was also found that with an increase in printing speed, the difference between the actual and theoretical printing times gradually decreases and the relationship between them is described by a power law, and for all types of designs.

A methodology was proposed for assessing the accuracy of manufacturing thin-walled large-sized molds based on finding the deviation field between 3D polygonal scanning of an object and the basic solid-state form, and the relationship between the deviation of the shape and the intensity of cooling was established. The study showed

the optimal values of the cooling modes. At sufficiently weak values, excessive deformation of the cross section of the applied material occurs, and at critically high values, the polymer shows high shrinkage, which also negatively affects the manufacturing accuracy.

The scientific novelty of the research lies in a comprehensive study of the formation process of polymer products created by the 3D printing method, namely, the size, geometry, nature of interlayer adhesion and deformation of the hot layer of a thermoplastic polymer material; methods have been created to develop and improve the process and equipment of FDM printing in the direction of increasing the isotropy of the characteristics of the final product.

The scientific and technical results of the dissertation work were introduced into the educational process of the Department of Chemical, Polymer and Silicate Engineering of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", as well as in LLC "Tukan ENGINEERING UKRAINE" (Kiev, Kiev region), which is confirmed by the acts of implementation.

Keywords: 3D printing, 3D printer, FDM, additive technology, interlayer adhesion, polymer, printing temperature, printing speed.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Статті у наукових фахових виданнях

1. The impact of 3D printing parameters on physical and mechanical properties of thermoplastic products/ Oleksyshen V.O., Sokolskyi A.L., Kolosov A.E., Solovei V.V. *Modern engineering and innovative technologies*. Karlsruhe, Germany. Is. No.11, Part 1, pp. 9-16. Publ. March 2020.
2. Determination of geometric and kinematic characteristics of FDM 3D print process/ Oleksyshen V.O., Sokolskyi A.L., Kolosov A.E., Solovei V.V. *Technology audit and production reserves*. 2020. No. 2/1 (52). Pp. 19-21.
3. Аналіз конструктивних особливостей та ефективності застосування сучасних FDM принтерів для просторового друку полімерних термопластичних

матеріалів/ Олексишен В.О. Вісник НТУ "ХП". Сер. "Нові рішення в сучасних технологіях". – 2020. - №1(3). - с. 25-34.

Апробація матеріалів дисертації на конференціях

1. Екструдер пристрою для тривимірного друку/ Олексишен В.О., Колосов О.Є., Сокольський О.Л., Івіцький І.І. *Матеріали XIII міжнар. наук.-техн. конференції "АВІА-2017"*. Київ: 19.04.2017. – С. 27.92-27.93.

2. Дослідження механічних характеристик полімерних зразків, створених методом просторового друку/ Олексишен В.О., Сокольський О.Л., Соловей В.В. *Збірник доповідей VI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки»*. – К.: 14.12.2017. – С. 22-23.

3. Моделювання процесу охолодження шарів полімеру у виробках, які виробляються методом 3D-друку/ Олексишен В. О., Сокольський О. Л., Колосов О. Є. *Збірник наукових праць VI Міжнародної науково-технічної конференції з проблем вищої освіти і науки ТК-2020 «Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів»*. м. Луцьк, 2-4 червня 2020 р. С. 175-177.

4. Проблемні питання застосування сучасних FDM принтерів для просторового друку полімерних термопластичних матеріалів/ Олексишен В. О., Сокольський О. Л., Колосов О. Є. *Збірник доповідей IX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн, об'єкти інтелектуальної власності та інноваційна діяльність студентів та молодих вчених»*, 29 квітня 2020 р. м. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – С. 35-38.

5. Some aspects of the additive production of thermoplastic products/ Oleksyshen V.O., Kolosov A.E., Sokolskyi A.L. Тез. доп. IV-ї міжнародної конференції «Прикладні науково-технічні дослідження». м. Івано-Франківськ, 01-03.04.2020. – С. 83-84.

Патенти України на корисні моделі

1. Екструдер пристрою для тривимірного друку: Пат.№117196U(UA):МПК (2006/01) В29С 47/58/ Олексишен В.О., Івіцький І.І., Сокольський О.Л.; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». и 2016 11462, 14.11.2016 Бюл. № 12/2017, 26.06.2017.

2. Екструдер пристрою для тривимірного друку армованих полімерних виробів: Пат. № 127343 U (UA) МПК (2006/01) В29С 31/04/ Олексишен В.О., Колосов О.Є., Сокольський О.Л. Соловей В.В.; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т»: и 2018 02156, 02. 03.2018 Бюл. № 14/2018, 25.07.2018.

3. Спосіб тривимірного друку полімерних виробів: Пат. № 131263 U (UA) МПК (2006.01) В29С 47/00/ Олексишен В.О., Колосов О.Є., Сокольський О.Л. Соловей В.В. заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т»: и 2018 07435, 03. 07.2018 Бюл. № 1/2019, 10.01.2019.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ	18
ВСТУП.....	19
1 СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОСТОРОВОГО ДРУКУ	27
1.1 Огляд основних технологій 3D друку	27
1.1.1 Фотополімеризація	28
1.1.2 Струменеве нанесення	28
1.1.3 Злипання матеріалу	29
1.1.4 Екструзія матеріалу	30
1.1.5 Порошкове спікання.....	31
1.1.6 Листове формування	32
1.1.7 Наплавлення спрямованою енергією.....	33
1.2 Вибір технології 3D-друку та розгляд її підвидів	34
1.2.1 3D друк на основі філаменту	35
1.2.2 3D друк на основі поршневої подачі	36
1.2.3 3D друк на основі гвинта Архімеда	37
1.3 Основні кінематичні схеми FDM принтерів	39
1.3.1 Картезіанська схема.....	39
1.3.2 Дельта схема.....	45
1.3.3 Полярна схема.....	47
1.3.4 3D принтер з роботизованим маніпулятором.....	47
1.3.5 Порівняння основних конструктивних характеристик.....	48
1.4 Огляд та вибір матеріалу для дослідження FDM друку	50
1.5 Огляд патентів конструкцій друкувальних головок FDM 3D принтерів... 50	
1.6 Огляд досліджень механічних властивостей друкованих виробів	52
1.7 Висновки і завдання досліджень	58
2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ	60
2.1 Розв’язуючі рівняння течії полімеру	60
2.2 Оцінка теплового потоку	62
2.3 Розташування фронту розплаву	64

2.4	Оцінка падіння тиску.....	65
2.5	Розширення і охолодження краплі розплаву	66
2.6	Осадження та стабілізація краплі.....	68
2.7	Охолодження шару та зв'язування полімерів	69
2.8	Моделювання охолодження та деформування шару полімеру.....	71
2.9	Застосування ітераційно-аналітичної теорії просторових систем.....	81
2.9.1	Застосування ітераційного алгоритму послідовних навантажень.....	85
2.9.2	Сутність методу податливості.....	88
2.10	Результати моделювання розшарування друкованого термопластичного полімерного зразка	92
2.11	Висновки.....	96
3	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	97
3.1	Опис обладнання для експериментальних досліджень	97
3.1.1	Опис FDM 3D-принтерів	97
3.1.2	Опис 3D сканерів	98
3.1.3	Установка для випробовування зразків на розтяг.....	99
3.2	Методика дослідження.....	102
3.2.1	Виготовлення зразків	102
3.2.2	Порядок проведення випробувань на розтяг	103
3.2.3	План досліджень	104
3.3	Розрахунок похибок дослідження.....	106
3.3.1	Методика розрахунку похибок прямих вимірювань	106
3.3.2	Розрахунок похибки вимірювання зусилля розтягу	107
3.3.3	Розрахунок похибки вимірювання відхилення форми	109
3.3.4	Розрахунок похибки вимірювання товщини	110
3.4	Дослідження друкованих зразків на міцність.....	112
3.4.1	Дослідження витратного матеріалу (філаменту).....	112
3.4.2	Дослідження зразків зі сталим перерізом та швидкістю руху екструдера, але різною температурою друку	112

3.4.3	Дослідження зразків з різним перерізом та сталою швидкістю руху екструдера та температурою друку	114
3.4.4	Дослідження друкованих зразків з різною товщиною наплавленого шару	115
3.4.5	Дослідження зразків з максимальним перерізом та різною швидкістю руху екструдера	116
3.4.6	Дослідження впливу термообробки та опромінення на міжшарову адгезію	118
3.4.7	Дослідження геометричних параметрів наплавленого шару	119
3.4.8	Дослідження динаміки нанесення матеріалу	121
3.4.9	Дослідження продуктивності просторового друку в залежності від типу механіки	125
3.4.10	Визначення модулів пружності та зсуву	128
3.4.11	Дослідження динаміки охолодження	129
3.5	Висновки	137
4	ВПРОВАДЖЕННЯ І РЕКОМЕНДАЦІЇ	139
4.1	Екструдер пристрою для тривимірного друку	139
4.2	Екструдер пристрою для тривимірного друку армованих полімерних виробів	140
4.3	Спосіб тривимірного друку полімерних матеріалів	142
4.4	Впровадження результатів науково-технічних розробок	143
4.5	Висновки	144
	ВИСНОВКИ	145
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	147
	ДОДАТКИ	156
	ДОДАТОК А РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗРАЗКІВ НА МІЦНІСТЬ	157
A.1.	Дослідження витратного матеріалу (філаменту)	157
A.2.	Дослідження зразків, друкованих за різних температур	157
A.3.	Дослідження друкованих зразків з різною площею поперечного перерізу	161

А.4. Дослідження друкованих зразків з різною товщиною наплавленого шару	163
А.5. Дослідження зразків, друкованих при різних швидкостях	164
А.6. Дослідження друкованих зразків після термообробки.....	166
А.7. Дослідження друкованих зразків після опромінення.....	167
ДОДАТОК Б РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИНАМІКИ РУХУ ДРУКУВАЛЬНОЇ ГОЛОВКИ.....	
Б.1. Визначення геометричних параметрів друкованого зразка	169
Б.1. Дослідження динаміки руху друкувальної головки в залежності від кінематичної схеми FDM 3D принтера.....	169
Б.3. Дослідження продуктивності друку в залежності від кінематичної схеми FDM 3D принтера	171
ДОДАТОК В ДОКУМЕНТИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ.....	
	173

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

$\Delta_{шару}$ – товщина шару, мм;

$t_{друку}$ – температура друку, °С;

$V_{друку}$ – швидкість друку, мм/с;

$d_{сопла}$ – діаметр формуючого отвору сопла, мм;

$S_{н.н.}$ – площа поперечного перерізу зразка, мм²;

t – товщина зразка, мм;

P – навантаження на розтяг, Н;

$[\sigma]$ – межа міцності на розтяг, МПа;

η – в'язкість, Па·с;

$\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, с⁻¹;

α – коефіцієнт тепловіддачі, ;

$T_{теор}$ – розрахунковий час друку, с;

$T_{ф}$ – фактичний час друку, с;

T' – відносна затримка друку, %;

dev – відхилення точки, мм;

$D_{рез}$ – загальне відхилення форми, мм

Основні скорочення:

FDM – Fused Deposition Modeling (формування методом наплавки);

PLA – Polylactic (полілактид);

3D – three-dimensional (тривимірний);

ТОВ – товариство з обмеженою відповідальністю (при назві установи);

ПП – приватне підприємство (при назві установи);

КПІ ім. Ігоря Сікорського – Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

ВСТУП

Актуальність теми. Технологія адитивного виробництва за останні роки набула широкого поширення майже у всіх сферах людського життя та галузях виробництва. Сама ідея просторового друку зародилася наприкінці наприкінці 1940-х років. Довгий час вона була лише частиною наукових досліджень.

Поступовий розвиток науки та техніки дав змогу отримати перші функціональні установки на межі 80-х та 90-х років ХХ ст. Вже на початку 2000-х років виробництво адитивного обладнання стало серійним. З тих пір спостерігається стійка тенденція зростання світового ринку обладнання адитивного виробництва: з 23 тис. штук у 2011 р. до 450 тис. штук у 2016 р. Очікується, що в 2020 р. буде продано 6,7 млн шт. пристроїв адитивного виробництва, а обсяг ринку зросте до 21 млрд. доларів США [1].

Кожен другий виробник в світі нарощує інвестиції в адитивне виробництво. Вже понад 80% прототипів та 60% функціональних вузлів виготовляються за допомогою просторового друку [2]. Аналітики всього світу вбачають вибуховий ріст в технології адитивного виробництва. Разом із зростанням продажів самих пристроїв, відбувається стрімкий ріст ринку супутніх товарів та послуг [3]. Основними драйверами зростання є підприємства, що впроваджують адитивні технології на заміну класичним методам промислового виробництва.

В умовах ринкової економіки та високої конкуренції найбільш важливими характеристиками будь-якого обладнання є його ціна та якість продукції. Не виключенням є обладнання для адитивного виробництва. Найпоширенішим типом устаткування для просторового друку є принтери, що працюють на основі технології FDM (Fused Deposition Modeling – формування методом наплавки).

Вартість такого обладнання залежить від багатьох чинників: якості комплектуючих механічної частини, розмірів робочої зони, типу сировинного матеріалу та ін. Одним з чинників, що впливають на вартість, є час на підбір параметрів друку для отримання необхідної якості виробу. Незважаючи на те, що

технологія 3D-друку полімерним матеріалом є широко розповсюдженою, відсутні точні данні для технологічних режимів процесу. Більшість значень підбираються інтуїтивно, виходячи з практичного досвіду. Це пояснюється тим, що полімерні матеріали мають складні фізико-хімічні властивості і, зазвичай, їх не враховують, або враховують лише частково, при проектуванні 3D-принтерів та при налагодженні процесу просторового друку конкретного виробу [4-5].

На якість сформованого (надрукованого) виробу впливають такі конструктивно-технологічні й режимні параметри, як температурний режим, питомі витрати сировинного матеріалу, режим охолодження вже екструдованого матеріалу, швидкість переміщення виконавчих органів, інерційність та геометрія рухомих вузлів. Зазвичай ці фактори не враховуються при проектуванні обладнання та при підготовці цифрової моделі до друку [4-5].

Також не враховують поведінку розплавленого матеріалу, що наноситься на вже застиглий шар матеріалу. Вважають, що матеріал має сталу у часі геометрію і параметри процесу охолодження не впливають на форму екструдованого матеріалу.

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

Робота виконувалась згідно з держбюджетною науково-дослідною роботою Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», а саме: «Конкурентоспроможна технологія формування конструкційних виробів з традиційних та наномодифікованих полімерних композиційних матеріалів» (№ 2027-п, 2017–2019 рр., № ДР 0117U000444; замовник – Міністерство освіти і науки України; автор – виконавець теми).

Мета і задачі дослідження є визначення взаємозалежності основних параметрів просторового друку, а саме товщини шару нанесеного полімерного матеріалу, температури екструдера, швидкості друку, режимних параметрів охолодження, дослідження фізико-механічних властивостей друкованих полімерних виробів, включаючи адгезійну міцність міжшарової взаємодії, в залежності від розмірів друкувальної головки та конструктивних особливостей

3D-принтера, а також вдосконалення конструкцій друкувальної головки для забезпечення максимальної продуктивності друку.

Відповідно до мети поставлено такі задачі:

- дослідити динаміку процесу просторового друку для різних кінематичних схем переміщення друкувальної головки;
- провести експериментальні дослідження міжшарової адгезії зразків, створених при різних параметрах друку та діаметрах сопла друкувальної головки;
- провести аналіз точності виготовлення методом просторового друку крупногабаритних виробів в залежності від динаміки охолодження полімерного матеріалу;
- провести числові дослідження процесу плавлення в каналі друкувальної головки та процесу охолодження нанесеного термопластичного полімерного матеріалу в залежності від діаметра сопла друкувальної головки та товщини шару нанесеного полімерного матеріалу;
- розробити на базі експериментальних досліджень та числового моделювання удосконалену конструкцію високопродуктивної друкувальної головки для виготовлення методом просторового друку крупногабаритних деталей;
- впровадити виконані розробки у хімічному та спеціальному машинобудуванні.

Об'єктом дослідження є FDM 3D-принтери, призначені для просторового друку полімерних термопластичних матеріалів.

Предметом дослідження є конструкції типових кінематичних схем FDM 3D-принтерів та їх вплив на розмірну точність одержуваних друкованих полімерних виробів, дослідження впливу температури екструдера, швидкості друку, режимних параметрів охолодження, а також товщини шару нанесеного полімерного матеріалу на фізико-механічні властивості, включаючи міжшарову адгезію надрукованого матеріалу, а також удосконалення конструкцій друкувальної головки.

Методи дослідження.

Поставлені в роботі задачі вирішувались на основі експериментальних досліджень механічних властивостей друкованих виробів, сучасних методів числового моделювання з використанням положень теорії суцільного середовища, методу скінченних елементів на базі експериментально визначених фізико-механічних властивостей друкованих зразків.

Наукова новизна отриманих результатів

Вперше:

- досліджено вплив режимних параметрів просторового друку, а саме температури екструдера, швидкості переміщення друкувальної головки та діаметра її сопла, а також товщини шару нанесеного полімерного матеріалу на величину міжшарової адгезії;
- досліджено кількісну залежність теоретичного часу друку від фактичного часу друку для типових кінематичних схем переміщення друкувальної головки і проведена оцінка точності та якості виготовлення друкованих виробів для досліджених кінематичних схем;
- проведено комплексне випробування друкованих зразків, що виготовлені різними діаметрами сопел друкувальної головки при різних режимах друку: товщини шару нанесеного полімерного матеріалу, температури екструдера, швидкості друку, режимних параметрів охолодження, а також встановлено вплив кожного з параметрів на величину міжшарової адгезії; це дає змогу встановити ефективні параметри просторового друку термопластичними полімерними матеріалами для одержання виробів з покращеними механічними характеристиками;
- проведено натурні та числові дослідження по динаміці охолодження пошарово нанесеного полімерного матеріалу на точність геометричної форми та на відхилення геометричних параметрів сформованих виробів від цифрової моделі друкованого виробу.

Удосконалено:

- математичну модель процесу просторового друку полімерних матеріалів рівняннями, що дозволяють враховувати міжшарову взаємодію та динаміку охолодження нанесеного розплавленого матеріалу;
- задачу двовимірною нестационарною охолодження в поєднанні з задачею руху неньютонівського матеріалу, що дає змогу встановити деформацію поперечного перерізу нанесеного шару;
- моделювання процесу розшарування друкованого полімерного термопластичного зразка під час одноосового розтягу в напрямку поперечному до напрямку нанесення шарів та зсуву в середовищах NASTRAN та ANSYS. Це дало змогу встановити типові місця початку та характер руйнування друкованого виробу;
- здійснено комп'ютерне моделювання процесу охолодження нанесеного термопластичного полімерного матеріалу в залежності від товщини шару в середовищі ANSYS POLYFLOW. Це дало змогу встановити розмір контакту між шарами виробу, внутрішню заповненість виробів та встановити оптимальні режими охолодження нанесеного матеріалу в залежності від товщини нанесеного термопластичного матеріалу та діаметра сопла друкувальної головки;

Дістало подальший розвиток:

- підходи до проектування ефективних конструкцій друкувальної головки із застосуванням методів експериментально-числового моделювання;
- підходи до виготовлення ефективних геометричних форм вихідного витратного матеріалу, що використовується у просторовому друці.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

- розроблено методику аналізу геометричної форми друкованих виробів методом просторового сканування та зворотного параметричного моделювання. Це дало змогу встановити відхилення розмірів та точності поверхонь друкованого виробу від теоретичної цифрової моделі в залежності від режиму охолодження процесу 3D друку;

- розроблено методику проведення досліджень міжшарової адгезії друкованих зразків, що дає змогу оцінити вплив режимів друку на адгезійну міцність надрукованого матеріалу;
- досліджено продуктивність друку 3D принтерів різних кінематичних схем переміщення друкувальної головки. Це дає змогу визначити вплив типу механіки 3D принтера на фактичний час друку в залежності від величини виробу;
- розроблена удосконалена конструкція друкувальної головки для друку великогабаритних виробів, на яку отримано патент України на корисну модель;
- розроблені рекомендації з виготовлення витратного термопластичного полімерного матеріалу, на які отримано патент України на корисну модель;
- встановлені параметри друку та охолодження, а також методи оцінки точності виготовлення виробів, які дали змогу виготовляти крупногабаритні моделі (розмірами понад 1000 мм) для аеродинамічних випробувань для ТОВ “ТУКАНА ІНЖИНІРИНГ УКРАЇНА”. Очікуваний економічний ефект від впровадження засобів просторового друку та науково-технічних рекомендацій 3D друку габаритних виробів склав близько 250 тис. грн. на рік;
- результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Особистий внесок здобувача полягає в наступному:

- досліджено вплив основних технологічних параметрів процесу просторового друку, а саме температури, швидкості друку та товщину шару на міжшарову адгезію термопластичного полімерного матеріалу;
- встановлено залежність зміни продуктивності процесу просторового друку від кінематичної схеми переміщення друкувальної головки;
- досліджено досягнення стабільності та точності розмірів і форми друкованих виробів в порівнянні з цифровою моделлю в залежності від режимів охолодження;

- удосконалено числову модель процесу охолодження при виході з друкувальної головки термопластичного полімерного матеріалу в процесі просторового друку;

- удосконалено математичну модель процесу нелінійного деформування багат шарових зразків, отриманих методом 3Д-друку.

Апробація результатів дисертації проводилась на таких конференціях і семінарах:

- XIII міжнародна науково-технічна конференція "ABIA-2017" (Київ, 2017);

- VI Всеукраїнська науково-практична конференція «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки» (Київ, 2017);

- XI Всеукраїнська науково-практична конференція «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки» (Київ, 2020);

- VI Міжнародна науково-технічна конференція з проблем вищої освіти і науки ТК-2020 «Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів» (м. Луцьк, 2020);

- IX Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн, об'єкти інтелектуальної власності та інноваційна діяльність студентів та молодих вчених» (Київ, 2020);

- IV-ї міжнародна конференція «Прикладні науково-технічні дослідження» (м. Івано-Франківськ, 2020).

Публікації. За темою роботи опубліковано 14 наукових праць, у тому числі 2 статті у наукових фахових виданнях України, з них 1 стаття у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз, 1 стаття у зарубіжному фаховому виданні, 3 патенти на корисну модель, 5 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Основна частина дисертації представлена на 128 сторінках і містить 87 рисунків. Загальний обсяг роботи становить 175 сторінок, у тому числі 3 додатки на 20 сторінках і список використаних джерел з 91 найменування на 9 сторінках.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОСТОРОВОГО ДРУКУ

1.1 Огляд основних технологій 3D друку

В наші дні у сфері технології просторового друку існує безліч пристроїв даної технології. Проте принциповою відмінністю між ними є метод побудови шарів майбутнього виробу та те, як відбувається переробка витратного матеріалу. Виходячи з цього існують наступні методи:

- формування методом наплавки (**Fused Deposition Modelling** або **Selective Deposition techniques**) – основним витратним матеріалом, як правило, є полімерна або композитна нитка, що плавиться в каналі друкувальної головки;
- селективне лазерне спікання (**Selective Laser Sintering** або **Selective Binding technologies**) – створення просторового об'єкту з порошку (як правило, металу чи гіпсу), застосовуючи зв'язувальні речовини або тепло для злиття частинок порошку разом;
- стереолітографія (**StereoLithography** або **Selective Solidification technologies**) - утворення об'єкту відбувається завдяки опроміненню ємності рідини (фотополімеру), застосовуючи явище фотополімеризації.

Нещодавно була прийнята також класифікація та набір стандартів, що регламентують виробничі процеси технології просторового друку [6]. Вона була розроблена Американським товариством випробувань та матеріалів (**American Society for Testing and Materials**) і включає наступні 7 категорій:

- Photopolymerisation (фотополімеризація);
- Material Jetting (струменеве нанесення);
- Binder Jetting (злипання матеріалу);
- Material Extrusion (екструзія);
- Powder Bed Fusion (порошкове спікання);
- Sheet Lamination (листова ламінація);
- Directed Energy Deposition (наплавлення спрямованою енергією).

1.1.1 Фотополімеризація

Метод 3D друку (рис. 1.1) [7], що базується на явищі фотополімеризації – твердінні реактопластичної смоли під дією опромінення. Такий принцип просторового друку з'явився одним із перших [8], перші розробки з'явилися в середині 70-х років ХХ ст. Спеціальна лазерна головка опромінює (засвічує) платформу згідно вигляду шару. Платформа опускається на товщину шару і процес повторюється знову. Готовий виріб дістають із робочої ванни і додатково опромінюють для остаточного твердіння.

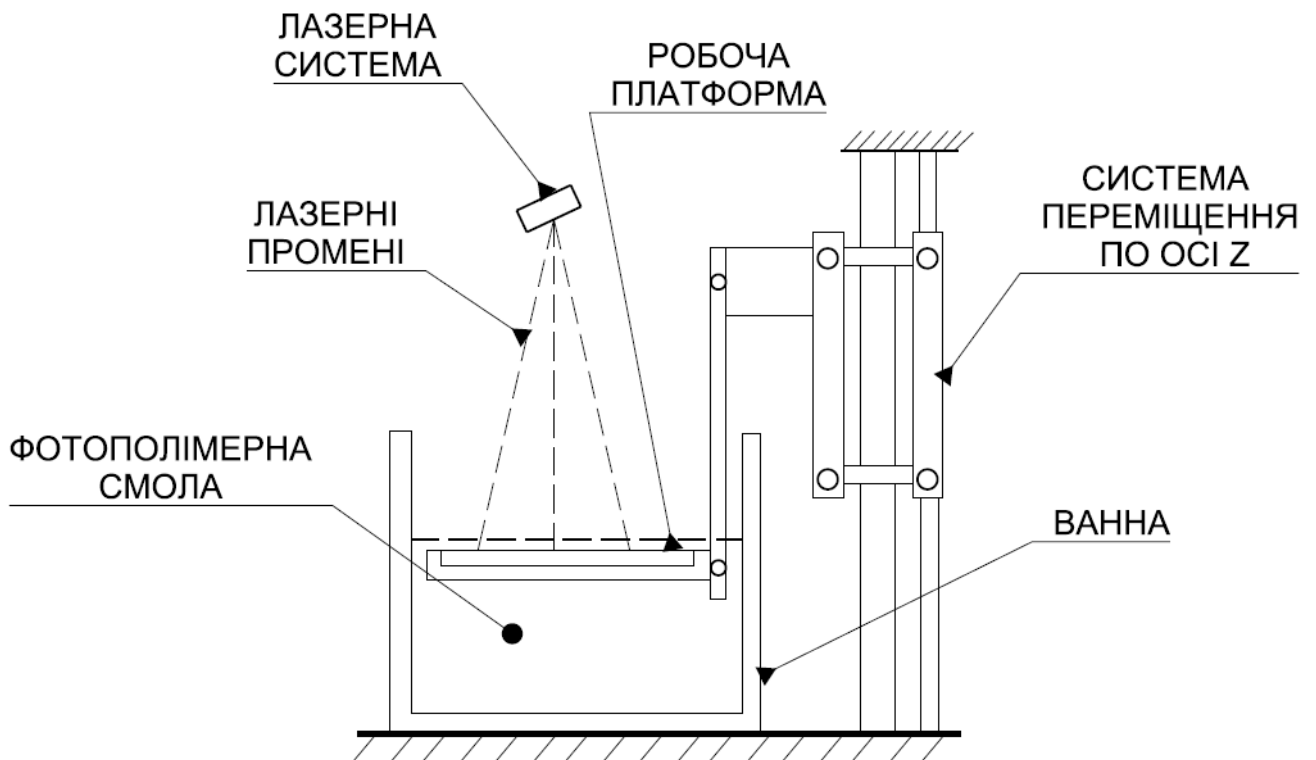


Рисунок 1.1 – Схема процесу фотополімеризації

1.1.2 Струменеве нанесення

Метод 3D-друку (рис. 1.2) [9], який створює об'єкти шляхом нанесення струменя матеріалу. Принцип схожий до класичного струменевого 2Д друку, проте замість фарб використовуються полімерні смоли низької в'язкості. На платформу розпилюється матеріал у вигляді шару, після чого відбувається опромінення, платформа опускається і процес повторюється. Процес дозволяє

створювати багатокольорові об'єкти високої якості з різних матеріалів, проте вибір витратного матеріалу обмежений.

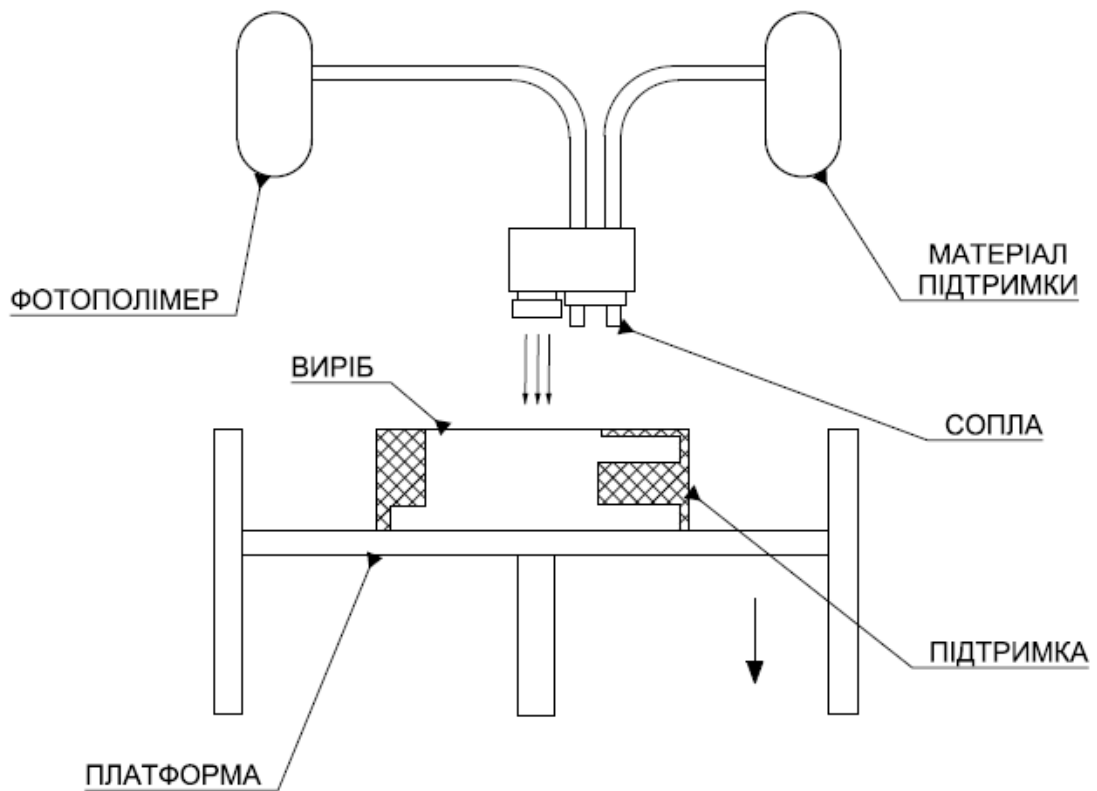


Рисунок 1.2 – Схема процесу струменевого нанесення

1.1.3 Злипання матеріалу

Технологія (рис. 1.3) [10] використовує порошок, як матеріал основи, і рідку сполучну. Процес наступний: на робочу платформу розподіляється порошковий витратний матеріал, друкувальна головка наносить зв'язуючий компонент у вигляді шару виробу, платформа опускається і процес повторюється знову. Процес дозволяє використовувати метали, полімери та кераміку, однак не завжди підходить для відповідальних деталей, через присутність нестабільного зв'язуючого матеріалу. Крім того якість поверхні недостатньо висока і часто необхідна пост-обробка.

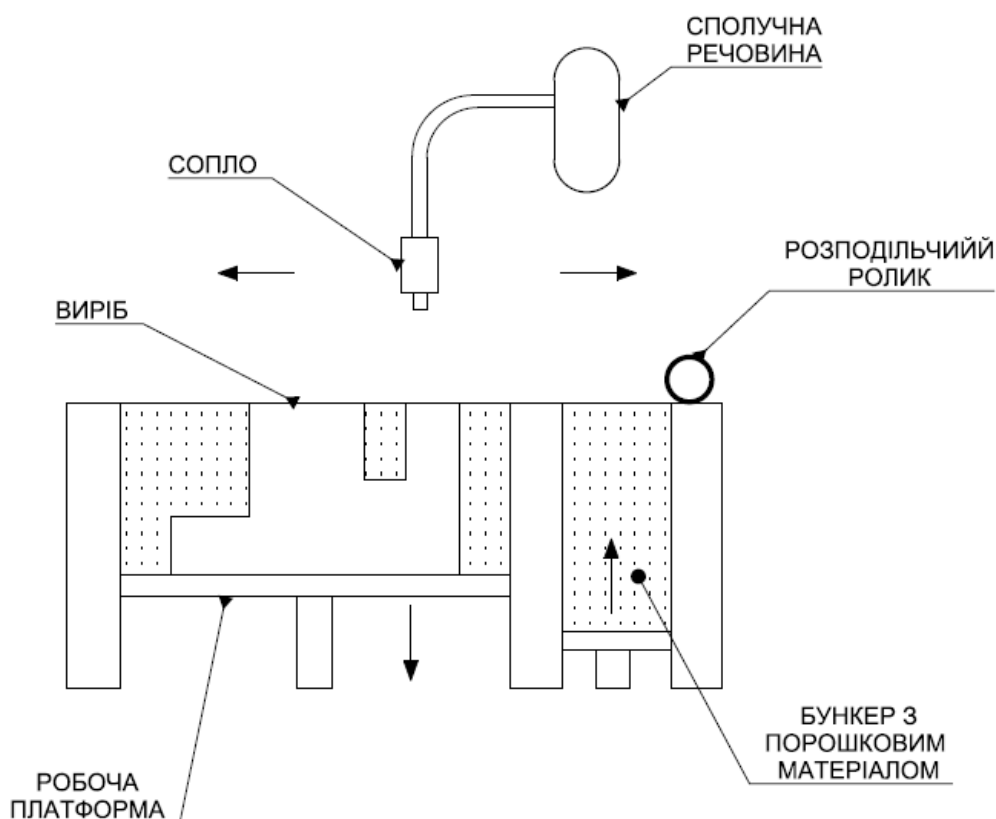


Рисунок 1.3 – Схема процесу злипання матеріалу

1.1.4 Екструзія матеріалу

Найбільш широко представлена формуванням методом наплавки (FDM - Fused Deposition Modelling) (рис. 1.4) [11]. Технологія зазвичай використовує полімерний матеріал у вигляді прутка (філаменту), що безперервно подається в циліндричний канал екструдера, розплавлюється і виходить через сопло. Екструдер постійно переміщується по траєкторії, що відповідає контурам шарів. Це найбільш популярна техніка, яка використовується на багатьох 3D-принтерах.

Процес є відносно недорогим, швидким і дозволяє використовувати широкий спектр матеріалів (ABS, PLA, нейлон, PET, coPET, PC, Elastan), проте точність кінцевої моделі є низькою порівняно з іншими технологіями 3D друку.

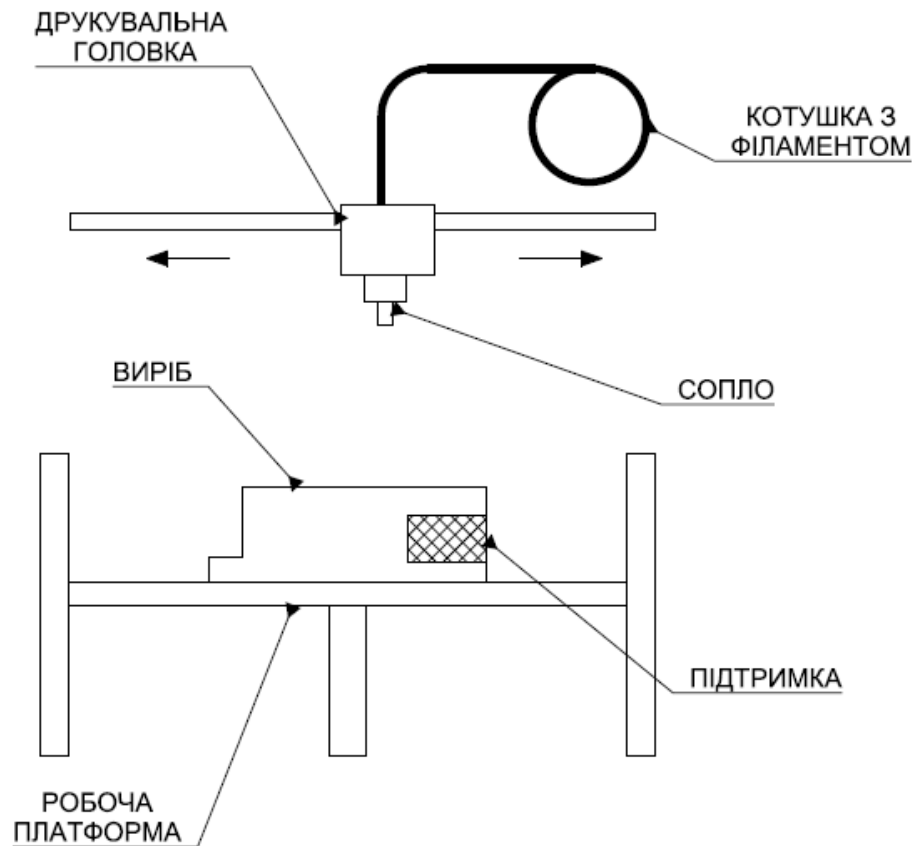


Рисунок 1.4 – Схема процесу екструзії матеріалу

1.1.5 Порошкове спікання

Технологія порошкового спікання (рис. 1.5) [12,13] включає наступні методи: направлене металеве лазерне спікання (DMLS - Direct Metal Laser Sintering), електронно-променеве плавлення (EBM - Electron Beam Melting), селективне теплове спікання (SHS - Selective heat sintering), селективне лазерне плавлення або спікання (SLM or S – Selective Laser Melting or Sintering).

Всі ці методики можуть бути подібними до попереднього процесу злипання матеріалу, але замість сполучного використовують лазерний, або електронний промінь, що опромінює витратний матеріал по формі шару виробу, для розплавлення порошку.

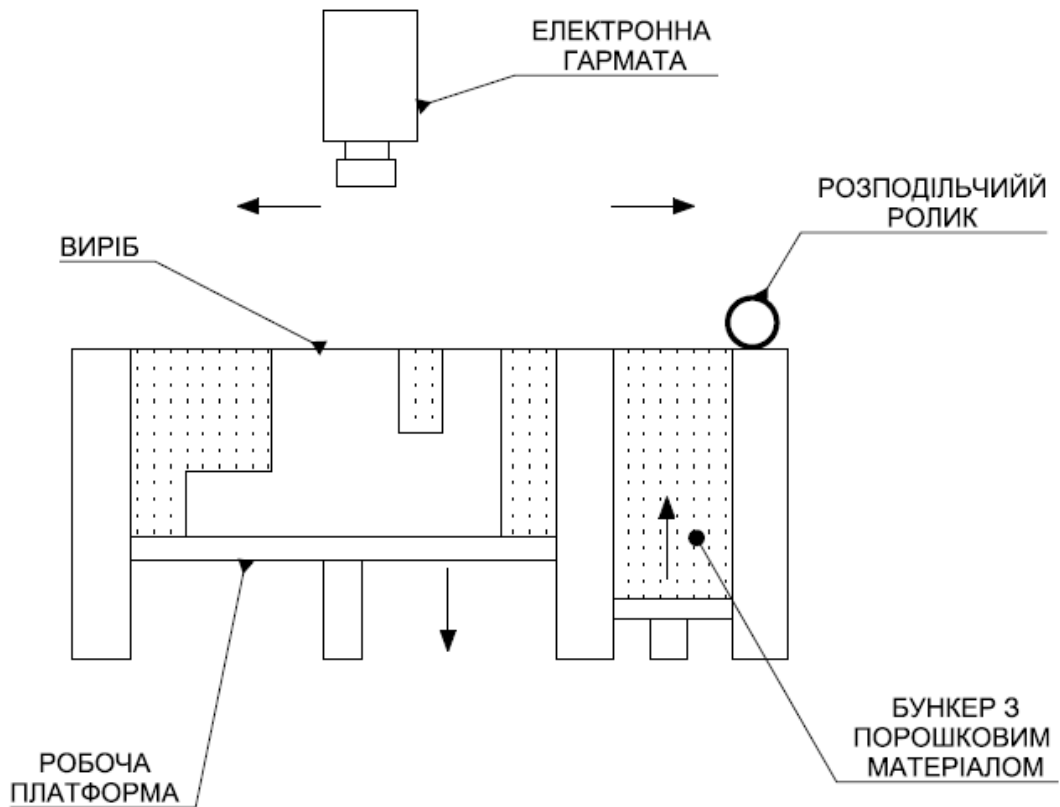


Рисунок 1.5 – Схема процесу порошкового спікання

Процесу є відносно точним, використовується великий асортимент матеріалів – метали та полімери, витратний матеріал також виконує роль підтримки. Проте швидкість друку повільна, потребує високих енергозатрат і складна в обслуговуванні.

1.1.6 Листове формування

Процеси листової ламинації (рис. 1.6) [14] включає ультразвукове аддитивне виробництво (UAM - Ultrasonic Additive Manufacturing) і виробництво листових об'єктів (LOM - Laminated Object Manufacturing). UAM використовує металеву фольгу (алюміній, мідь, нержавіюча сталь титан), які з'єднуються між собою за допомогою ультразвукового зварювання. LOM являє собою аналогічний процес, але використовує папір і клей замість металу і зварювання.

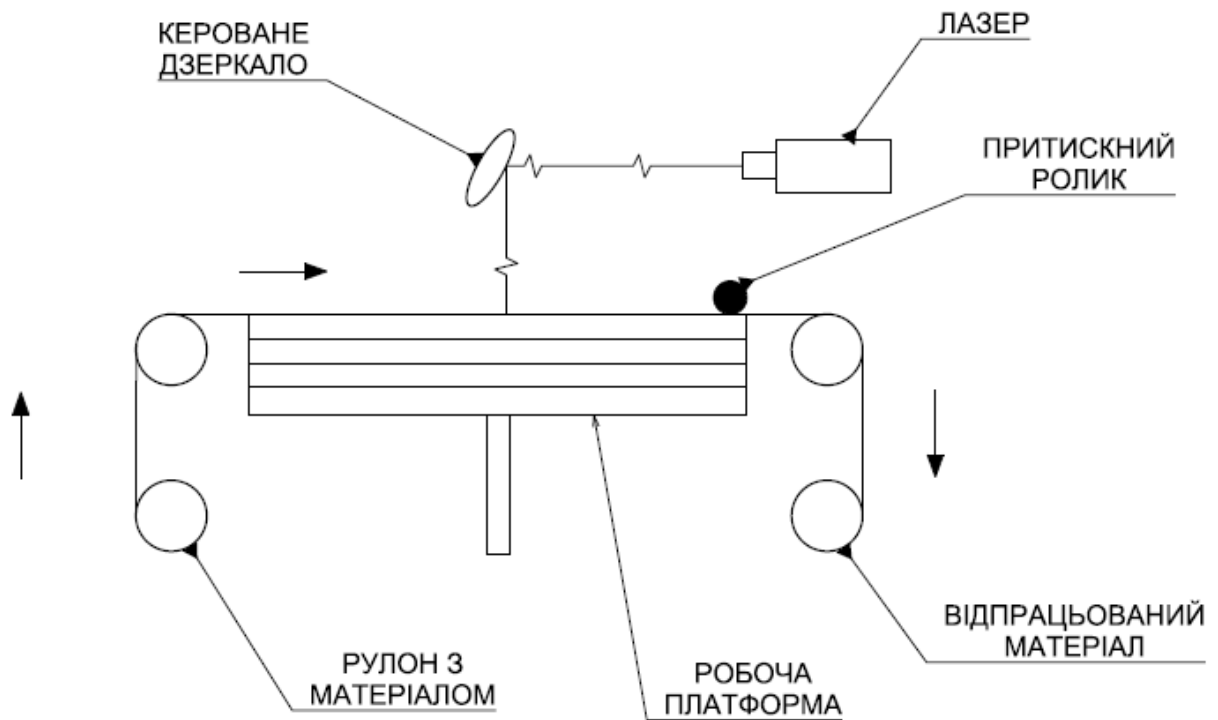


Рисунок 1.6 – Схема процесу листового формування

Процес відбувається при низькій температурі, тому, оскільки метал не плавиться, вимагає відносно невеликої енергії. Крім того, основним сировинним матеріалом є фольга або плівка, яка значно знижує витрати. Проте, використовуються переважно для декоративних моделей не придатних для функціонального використання.

1.1.7 Наплавлення спрямованою енергією

Наплавлення спрямованою енергією (DED - Directed Energy Deposition) є найтехнологічнішим процесом і використовується в передових сучасних виробництвах для виготовлення унікальних виробів (рис. 1.7) [15]. Основою є роботизована рука-маніпулятор (4 – 5 ступенів свободи), що поступово подає матеріал у вигляді дроту та енергію для його плавлення в кожному точці виробу.

Процес є високоточним, використовує різні типи витратного матеріалу дає можливість контролювати структуру зерна, завдяки чому якість готової деталі

надзвичайно висока. Проте очевидно, що даний процес достатньо складний і дорогий, використовується в одиничних випадках та потребує додаткового вивчення.

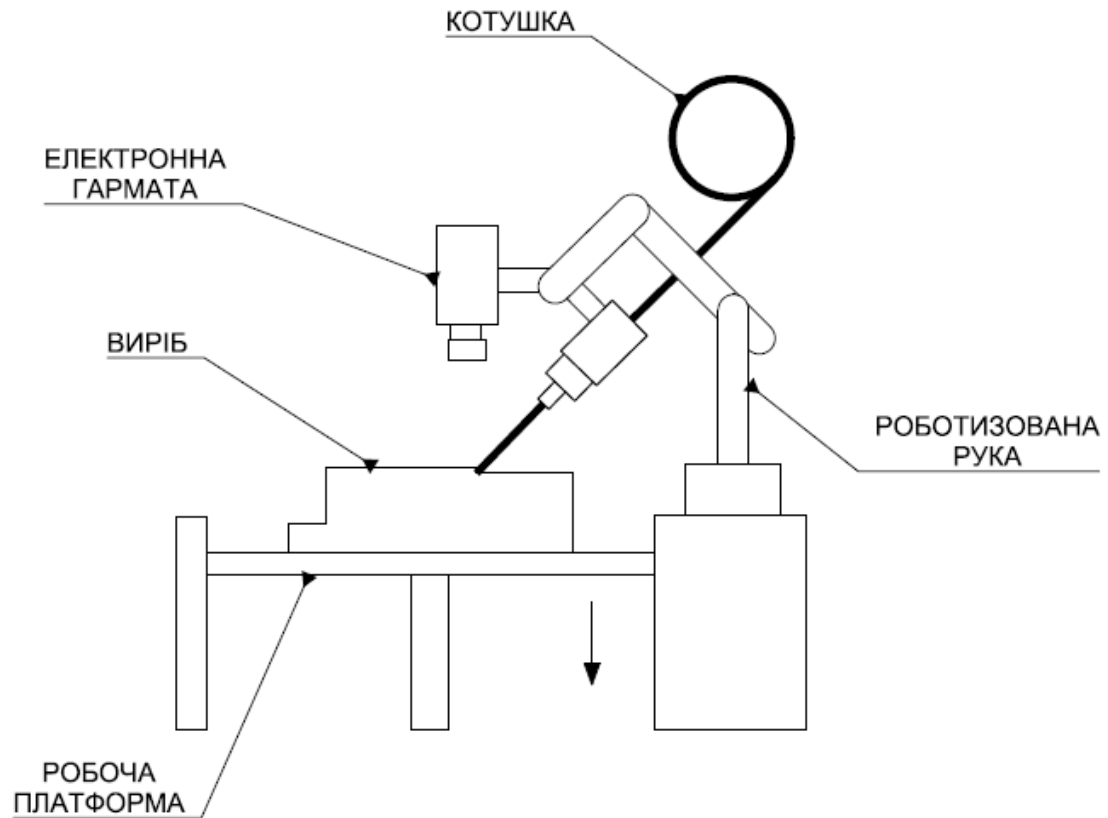


Рисунок 1.7 – Схема процесу спрямованого наплавлення

1.2 Вибір технології 3D-друку та розгляд її підвидів

Розглянувши основні сучасні технології 3D друку, з'ясувалось, що більшість з них є недостатньо вивченими і часто існують у вигляді прототипів. Найбільш цікавим є вивчення FDM принтерів через те, що:

- даний клас принтерів є найбільш розповсюдженим і темпи поширення є експоненціальними;
- відносна дешевизна робить дослідження більш доступним;
- достатня простота витратного матеріалу;
- більшість налаштувань зроблено з практичного досвіду і не мають наукового підґрунтя;

- дослідження характеристик та природи робочого матеріалу в процесі 3D друку є особливо цікавим для розвитку технології переробки полімерів.

Розглянемо основні види FDM 3D принтерів з точки зору принципу дії робочої головки:

1. 3D друк на основі філаменту.
2. 3D друк на основі поршневої подачі.
3. 3D друк на основі гвинта Архімеда.

1.2.1 3D друк на основі філаменту

Друк з використанням полімерної стрічки (філаменту) або Fused Deposition Modeling (FDM) був розроблений С. Скотом Крампом наприкінці 1980-х років і є найрозповсюдженою технологією 3D друку [16, 17]. FDM принтер (рис. 1.8) використовує термопластичний полімерний або композитний дріт (філамент).

Витратний матеріал, через роликівий механізм подачі, подається та плавиться в каналі друкувальної головки. Розплав виходить через сопло під час його руху, по заданій траєкторії. Пластик наноситься на платформу, слідуючи керуючій програмі. Після завершення нанесення одного шару, друкувальна головка піднімається або робоча платформа опускається на товщину шару, і наноситься наступний шар.

FDM принтери формують деталі з широкого діапазону термопластичних матеріалів (акрилонітрил-бутадієнстирол (ABS), полілактид (PLA), полікарбонат (PC), поліетилентерефталат (PET) і т.д.), а також композицій на їх основі (переважно додаються дискретні органічні волокна або металічні порошки).

Асортимент сучасного витратного матеріалу задовольняє практично всі потреби щодо властивостей друкованих деталей, що дозволяє використовувати в широкому спектрі галузей виробництва – від дрібного прототипування та навчального процесу до повноцінного промислового виробництва.

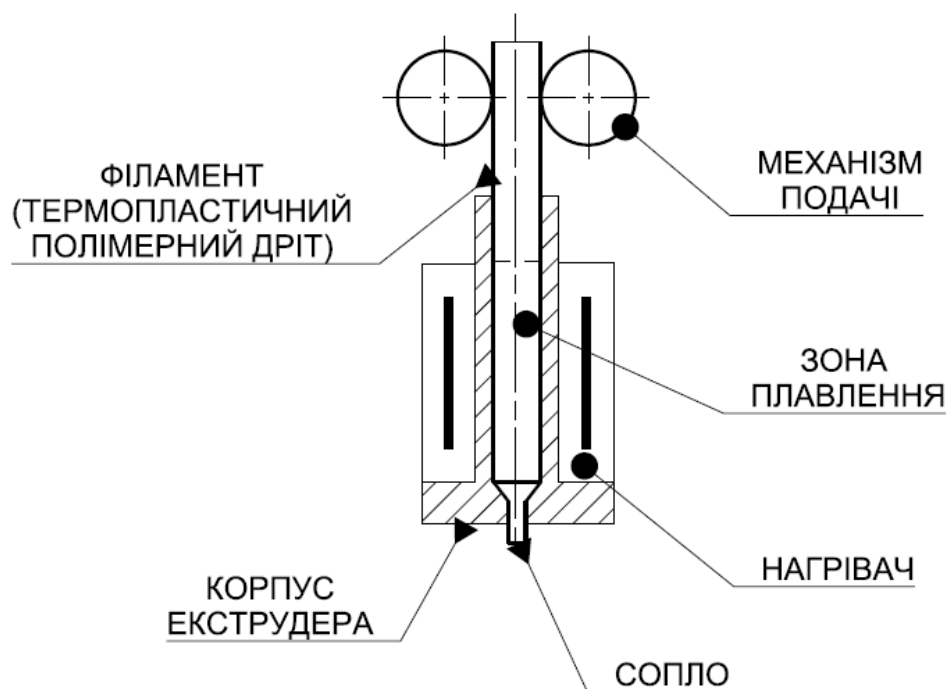


Рисунок 1.8 – Принципова схема друкувальної головки FDM 3D принтера, що використовує філамент

1.2.2 3D друк на основі поршневої подачі

Робочий бункер заповнюється матеріалом і нагрівають до робочої температури (рис. 1.9). Зусилля подається на розплавлений матеріал за допомогою переміщення поршня, який виштовхує матеріал з сопла, по траєкторії відповідно до 3D-моделі.

Незважаючи на свою простоту і переваги процесу, є деякі важливі недоліки:

- якщо об'єкт занадто великий, може бути необхідним повторне наповнення поршня, що викликає перебої в процесі друку та охолодження друкованого виробу і поршня, що призводить до поганої адгезії між шарами;

- матеріал нагрівається уздовж поршня, так що більш вищий матеріал через деякий час при підвищеній температурі зазнає термічної деградації, що призводить до поганих властивостей матеріалу;

- важливо, що поршень містить повітря, який перериває процес, а також повітряні інкапсуляції в матеріалі гранул;

- дана конструкція розроблялась для роботи з полімерними матеріалами, проте дістала поширення в медичному напрямі розвитку адитивних технологій, а саме в роботі зі стовбуровими клітинами.

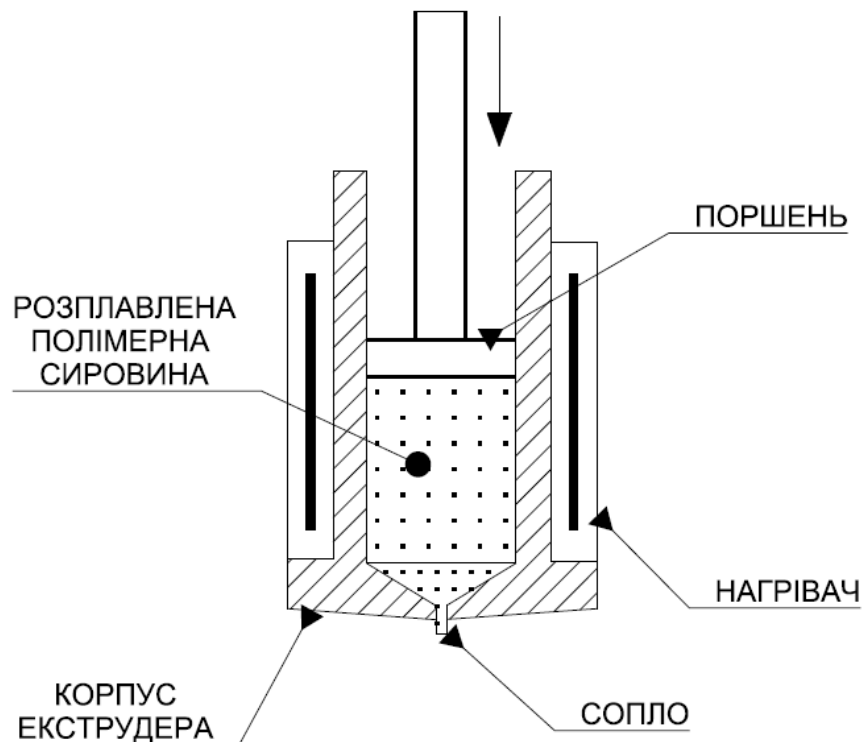


Рисунок 1.9 – Принципова схема друкувальної головки FDM 3D принтера з поршневою подачею

1.2.3 3D друк на основі гвинта Архімеда

Останній тип FDM 3D принтерів є принтер з гвинтом Архімеда (шнеком) (рис. 1.10). Ідея полягає в тому, щоб створити FDM 3D принтер, що використовує стандартну гранулу, а не високовартісну термопластичну полімерну стренгу. Головним елементом друкувальної головки являється трисекційний міні – шнек (аналогічні використовують в промислових екструдерах). Основними перевагами даного типу є:

- можливість використання гранул як матеріалу, що подається;
- може бути реалізований безперервний процес;
- шнек створює однорідне плавлення;

- можливо використовувати практично всі типи гранул та створювати композиції на їх основі.

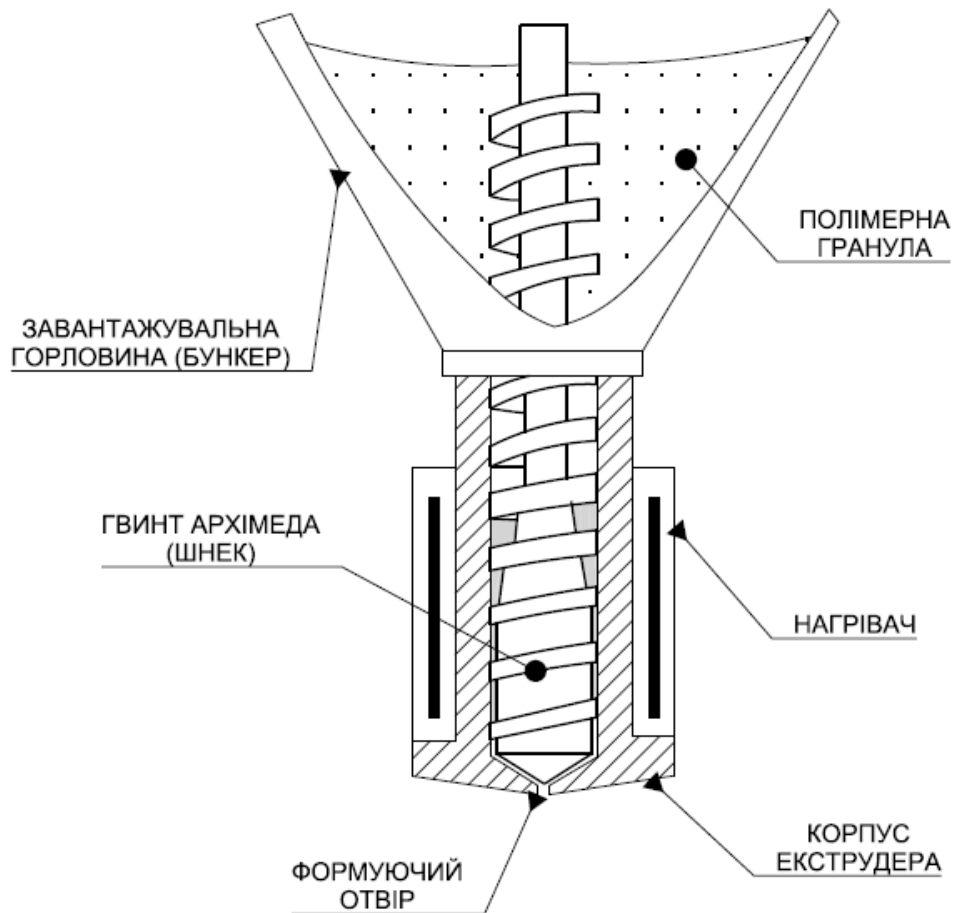


Рисунок 1.10 – Принципова схема друкувальної головки FDM 3D принтера з гвинтом Архімеда (шнеком)

Проте, не дивлячись на все переваги, даний тип принтера реалізований лише у вигляді тестових прототипів і на теперішній час не існує функціональних серійних моделей. Основною проблемою даного типу є складна конструкція, пульсація подачі для малих діаметрів сопел та висока маса рухомих частин механізму переміщення друкувальної головки.

Даній конструкції приділено мало уваги і, в разі створення функціонального серійного обладнання, буде різко зменшено собівартість 3D друку та розширено галузі використання FDM технології, особливо в напрямі крупногабаритного друку та формуванні виробів з композиційних матеріалів.

1.3 Основні кінематичні схеми FDM принтерів

На даний момент основними типами кінематичних схем сучасних FDM принтерів для друку з полімерних матеріалів та композицій є: картезіанські, дельта, полярні та роботизовані кінематичні схеми.

1.3.1 Картезіанська схема

Картезіанська схема - це схема при якій основні робочі органи 3D принтера (друкувальна головка та робоча платформа) пересуваються вздовж взаємоперпендикулярних осей X , Y та Z . Тому таку схему ще називають декартовою, бо всі робочі переміщення пристрою описуються в декартових координатах. В залежності від того вздовж яких з осей переміщуються або навпаки є статичними друкувальна головка та робоча платформа, існують наступні варіанти кінематичних схем 3D принтера:

1. Платформа рухається вздовж однієї горизонтальної осі (X або Y), а екструдер по іншій горизонтальній та вертикальній Z .

Наймасовішою моделлю такої схеми є 3D принтер Prusa Йозефа Пруса) (рис. 1.11) [18, 19]. Дана модель, розроблена чеським інженером Йозефом Пруши, з'явилась на ринку в 2012 році і з тих пір стала однією з найпопулярніших у світі. Дана модель та кінематична схема загалом має просту механіку, відносно низькі вимоги до комплектуючих, проста в обслуговуванні, відкриту конструкторську документацію та програмне забезпечення.

Серед недоліків особливо необхідно виділити наступні:

- відкритий корпус створює нестабільний градієнт температур робочої зони, внаслідок чого неможливий друк цілою низкою матеріалів;
- рухома робоча платформа зменшує точність позиціонування друкувальної головки та збільшує загальну вібрацію конструкції;
- внаслідок того, що робоча платформа рухома, в більшості випадків її габарити не перевищують 200 мм по всім осям.

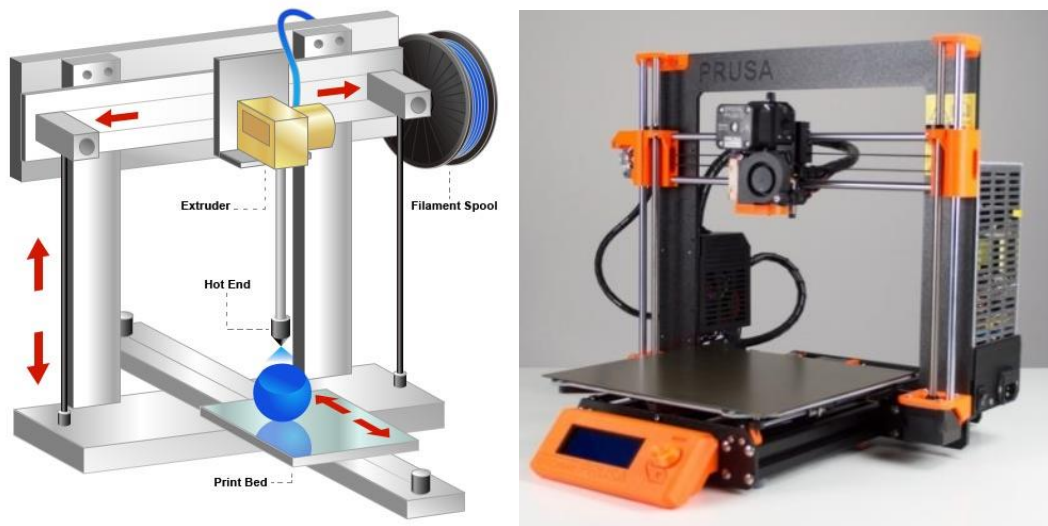


Рисунок 1.11 – FDM 3D принтер конструкції Prusa

2. Платформа рухається вздовж вертикальної осі Z, а екструдер в горизонтальній площині по осям X та Y.

Така схема є найбільш популярною як для любительських, так і для професійних 3D принтерів. Головними підвидами даної кінематики є: Makerbot [20], CoreXY [21] та H-Bot [22].

Кінематика Makerbot отримала назву від компанії, що вперше випустила принтер даної схеми [20] (рис. 1.12). В такій схемі двигун, що переміщує друкувальну головку вздовж осі X, рухається вздовж осі Y. Робоча платформа кріпиться консольно до осі Z і є незалежною від інших осей. Таке компонування дає певні переваги: стабільний градієнт робочої зони, закритий корпус дозволяє вести друк більшою кількістю видів розхідного матеріалу. До недоліків відносять:

- двигун (маса крокового двигуна Nema 17 становить 350г), що переміщує друкувальну головку, значно підвищує інертність, тому максимальна швидкість друку не перевищує 50-70 мм/с;
- відносно висока складність механіки значно підвищує вимоги до якості комплектуючих, обслуговування та кваліфікації оператора;
- консольне кріплення стола обмежує габарити робочої зони.

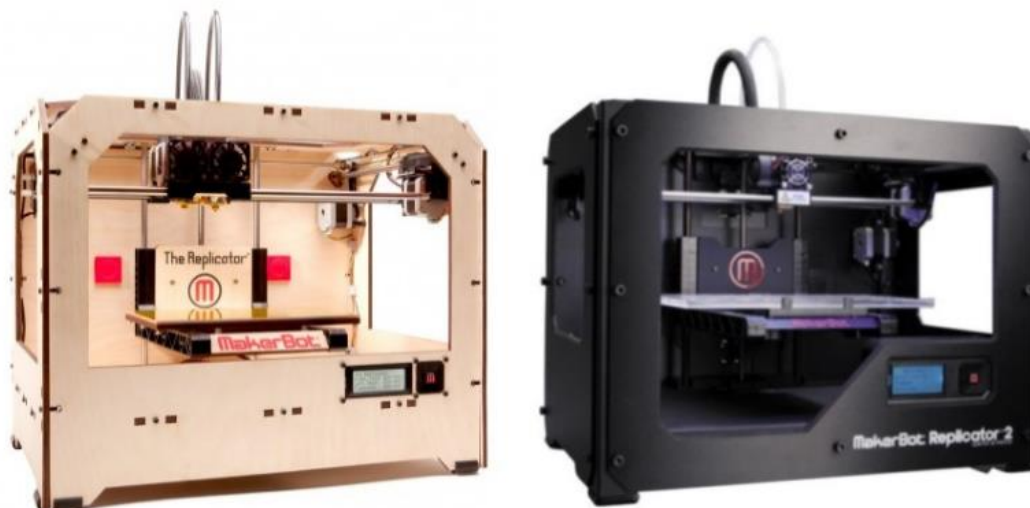


Рисунок 1.12 - FDM 3D принтер конструкції Makerbot різних поколінь

Кінематика **CoreXY** являється подальшим розвитком кінематики **Makerbot** (рис. 1.13). В даній конструкції відсутній кроковий двигун на рухомій осі. Всі двигуни зафіксовані на несучій рамі. Друкувальна головка кріпиться на перетині двох взаємоперпендикулярних валів, що фіксуються на осях X та Y. Дана конструкція дає високу якість та точність друку, проста в обслуговуванні, відносно невисоку вартість, тому є однією з найпоширеніших. Яскравим представником даної кінематики є принтер компанії **Ultimaker**.

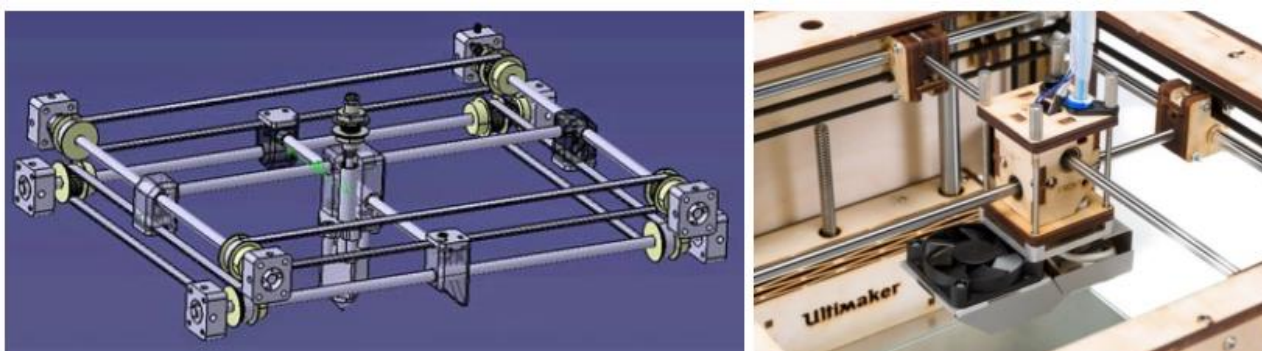


Рисунок 1.13 – Конструкції механіки типу CoreXY

На даний момент найбільш досконалою конструкцією вважають схему H-Bot [22] (рис. 1.14). Часто дану кінематику включають до типу CoreXY, проте вона має ряд принципових відмінностей. Основним є те, що вся система приводиться в рух за допомогою одного зубчатого ремня, що охоплює весь механізм по H-образній траєкторії. Друкувальна головка рухається по рельсовій

направляючій, кінці якої закріплені до направляючих осі Y. Дана схема реалізована в багатьох серійних FDM 3D принтерах, проте найбільш популярна серед кастомних (зібраних власноруч з використанням відкритого коду) принтерів.

До переваг даної схеми слід віднести: мінімальна інерція рухомих органів (переміщується тільки друкувальна головка загальною масою зазвичай від 50 до 120 грам); рух робочої платформи відбувається по осі Z в закритому корпусі, тому градієнт температур стабільний; висока точність друку (точність розмірів готового виробу по осям X та Y досягає $\pm 0,01 - 0,1$ мм) та швидкість друку (низька маса друкувальної головки дозволяє досягати швидкість друку до 120 мм/с). Серед недоліків слід відзначити високі вимоги до деталей осей X та Y (допуски валів, матеріали втулок) та максимально допустимого взаємного розташування напрямних валів (кут нахилу у всіх площинах не більше $90^\circ \pm 10''$).

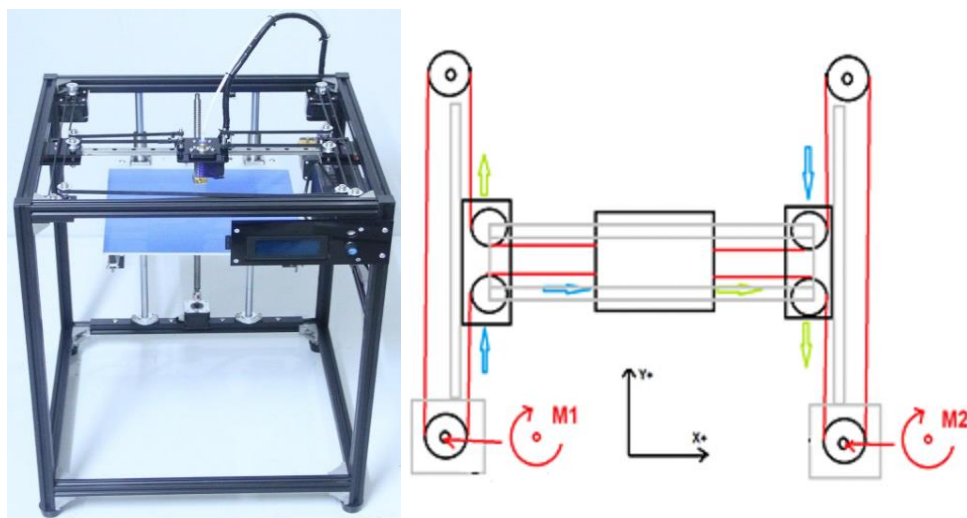


Рисунок 1.14 – FDM 3D-принтер з механікою типу H-Bot

Переваги кінематики H-Bot по суті є такими ж як і в механіки CoreXY, окрім цього до переваг можна віднести простоту конструкції та обслуговування. Проте є необхідність використовувати високоякісні рельсові направляючі, а також існують підвищені вимоги до жорсткості конструкції осей X та Y, так як при діагональному русі, рухома балка пересувається одним двигуном, що в свою чергу створює перекіс і можливе розбалансування конструкції.

Кінематики типів Core XY та H-Bot на даний момент є найбільш популярними у світі, їх використовують як головні виробники серійних 3D принтерів так і окремі інженери для створення кастомного обладнання. Дані кінематики дозволяють створювати устаткування, що вирішує широкий спектр задач. 3D принтери на базі Core XY та H-Bot використовують у автомобільній, авіабудівній промисловості, інженерних розробках, індустрії розваг, мистецтві.

3. Платформа рухається по одній горизонтальній та вертикальній осі, екструдер – по іншій горизонтальній осі.

Подібна до Prusa, але платформа рухається ще і по вертикальній осі Z. Дана схема (рис. 1.15) не є достатньо поширеною, єдиною комерційною моделлю є принтер UP від компанії PP3DP [23].

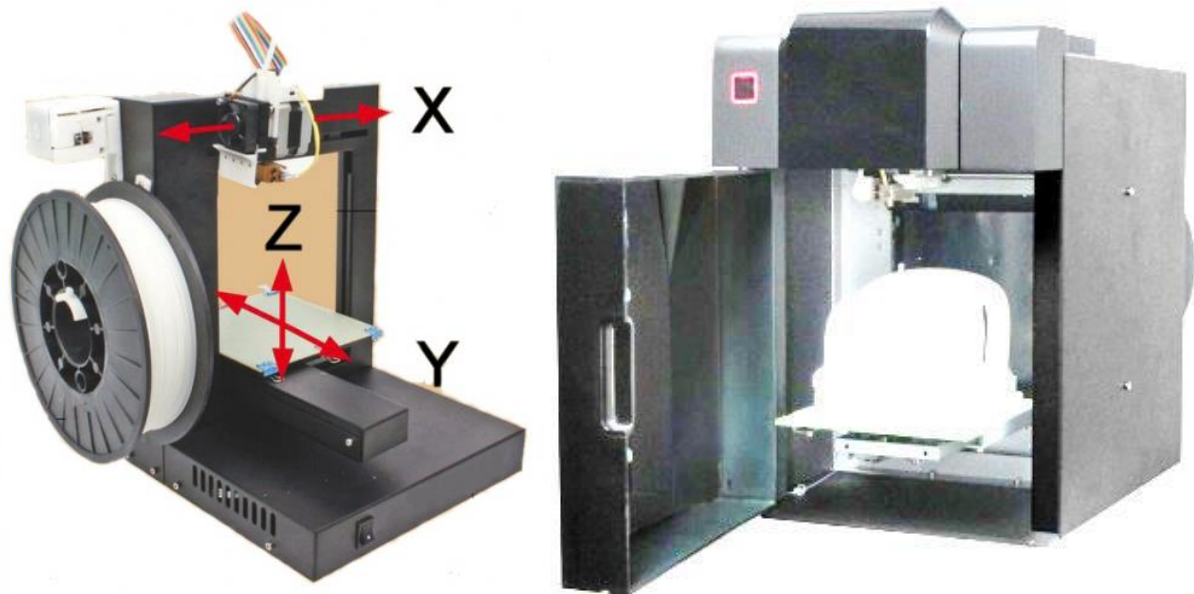


Рисунок 1.15 – FDM 3D-принтер UP компанії PP3DP з відкритим та закритим корпусом

Серед переваг виділяють незалежність осей, можливість збільшувати висоту друку (до 500 мм), відносно високу якість друку (точність друку досягає 0,15 мм, а висота шару матеріалу може досягати 150 мк) та простоту в обслуговуванні. Проте висока інертність (маса рухомих частин може досягати 1 кг) та нестабільність градієнта робочої зони зменшує продуктивність та кількість видів витратних матеріалів.

4. Платформа нерухома, а екструдер рухається по осям X,Y та Z

Така компоновка використовується для крупногабаритного друку, коли вага деталі від декількох кілограм, а розміри від 500 мм. Для друку таких деталей навіть мінімальний вплив зміни температурного градієнту є неприпустимим. Дана схема поширена в індустріальному прототипуванні. 3D принтери такої схеми серійно виготовляються компанією Cosine [24] (рис. 1.16).

Переваги:

- градієнт температури максимально стабільний (робоча зона знаходиться в термокамері, що дає змоги чітко підтримувати необхідну температуру від 40 до 100°C);
- можливість друку надвеликих об'єктів (робоча зона складає до 1100x850x850 мм);
- загальна низька інерція (переміщується лише друкувальна головка масою менше 1 кг)

Недоліки:

- складність механіки та обслуговування;
- висока вартість та експлуатаційні витрати (устаткування коштує від 40 тисяч USD, потребує приміщень промислового призначення).



Рисунок 1.16 – Промисловий FDM 3D-принтер AM1 компанії Cosine

5. Платформа рухається по горизонтальним осям X та Y, екструдер рухається по Z.

Дана механіка цікава тим, що друк по суті відбувається навколо нерухомого екструдера. Проте широкого практичного використання така механіка не отримала. Переважно така механіка використовується в приватних невеликих проектах для дослідження деяких процесів. Прикладом серійного 3D принтера є проект Текма 3D (рис. 1.17) [25].

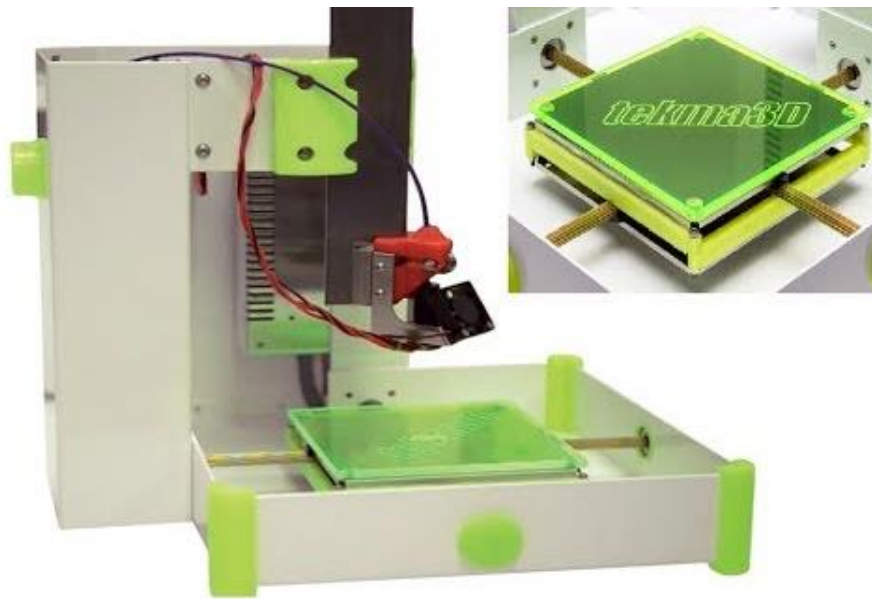


Рисунок 1.17 – FDM 3D-принтер Текма3D TM1

Широкого практичного використання така механіка не отримала з ряду очевидних причин: низька якість друку (близько 1 мм), мала робоча зона (до 100x100x100 мм), відсутність відкритого коду для програмного забезпечення тощо. Переважно така механіка використовується в приватних невеликих проектах для дослідження деяких властивостей витратного матеріалу та навчальних цілях.

1.3.2 Дельта схема

Механіка типу Дельта [26] (рис. 1.18) унікальна тим, що переміщення друкувальної головки відбувається за допомогою взаємозалежних направляючих осей XYZ, що в просторі утворюють піраміду - тетраедр. Для визначення

переміщень необхідна тригонометрична функція, що залежить від просторових кутів положення направляючих. Такий принцип дозволяє точно позиціонувати екструдер, але невеличке відхилення по одній з осей під час збирання пристрою призводить до загального збою в позиціонуванні.

Загалом така конструкція має меншу кількість деталей механіки (близько 20-30%), дозволяє вести друк за більшої швидкості друку в порівнянні з картезіанськими схемами (можливо досягти швидкості до 200 мм/с), під час друку відсутній “воблінг” (періодична нерівномірність шарів по вертикальній осі Z). Проте всі переваги можливі за умови використання більш точних деталей механіки (допустиме відхилення геометричних розмірів напрямних до 50 мк) та більш потужної електроніки (потрібно використовувати цифрові плати з 32-бітною архітектурою). Також довгі направляючі призводять до неефективного використання осі Z (тяги займають до 40% довжини направляючих).



Рисунок 1.18 – Типовий вигляд FDM 3D-принтерів типу Дельта:
(зліва направо) Mass Portal D300, 3DQuality Prism Pro Dual, Anet A4

1.3.3 Полярна схема

Полярна кінематика є найновішою, де позиціонування екструдера задається не координатами XYZ, а радіусом та кутом. Платформа в такій схемі кругла, обертається та рухається вздовж горизонтальної осі. Найбільш широко на ринку представлена моделлю компанії Polar [27] (рис. 1.19).

3D-принтери такої схеми мають доволі просту механіку, легкі в обслуговуванні, проте відносно низька точність друку (відхилення може досягати $\pm 0,5$ мм), нестабільний градієнт робочої зони та високу інертність (маса рухомих частин досягає 1 кг) не дали змоги дістати популярність серед користувачів.

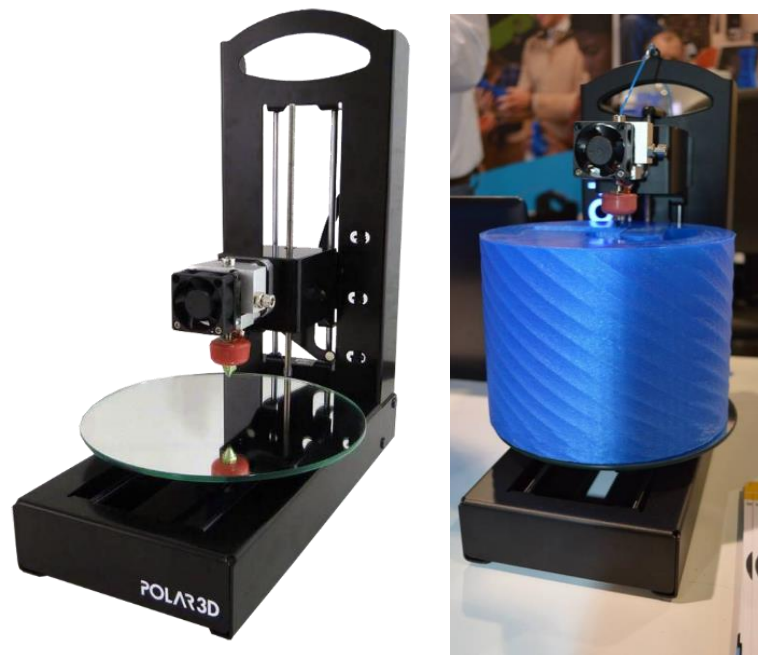


Рисунок 1.19 – FDM 3D-принтер Polar 3D

1.3.4 3D принтер з роботизованим маніпулятором

Являється найбільш сучасною комплексною схемою [28] (рис. 1.20). Вона включає механіку на основі роботизованого маніпулятора на яку кріпиться екструзійна головка. Така схема є багатофункціональною (дозволяє виконувати

інші види робіт після заміни робочих органів), високоточною, з великою робочою зоною, її легко інтегрувати в серійне виробництво.

Переважно використовується як доповнення до серійного виробництва, як початкова спроба замінити класичні методи обробки матеріалів в технологічних лініях. Експлуатація подібного обладнання вимагає високої кваліфікації обслуговуючого персоналу і використовується на високотехнологічних виробництвах та конструкторських бюро.



Рисунок 1.20 – Портативний багатофункціональний роботизований маніпулятор з можливістю 3D друку DOBOT M1

1.3.5 Порівняння основних конструктивних характеристик

Огляд основних конструктивних схем встановив, що основними параметрами, що впливають на якість та ефективність друку, а також на вибір обладнання в залежності від отримуваних виробів, є: точність друку (позиціонування друкувальної головки), рухомість робочої платформи в площині нанесення витратного полімерного матеріалу, габарити зони формування виробів, швидкість переміщення друкувальної головки, складність конструкції та обслуговування, ціна устаткування.

Нижче наведено порівняльна зведена таблиця характеристик основних моделей FDM 3D принтерів кожної з розглянутих схем. Оцінка 1 відповідає

низькому, 2 – середньому, а 3 – високому діапазону значень відповідної характеристики.

Таблиця 1.1 – Порівняльна оцінка основних характеристик FDM 3D принтерів основних кінематичних схем

	Точність друку (позиціонування)	Рухомість стола по X та Y	Розмір робочої зони	Швидкість друку	Складність конструкції	Обслуговування	Ціна
Prusa i3	2	+	1	2	1	1	1
Makerbot	2	-	2	2	2	2	2
Ultimaker	2	-	2	2	2	2	2
H-Bot Cust	3	-	3	2	2	2	2
PP3DP	2	+	1	2	1	1	1
AM1	3	-	3	3	3	3	3
Tekma 3D	1	+	1	1	2	2	1
Anet A4	3	-	2	3	3	3	2
Polar 3D	2	-	1	2	2	2	1
Dobot M1	3	-	3	2	3	3	3

Проаналізувавши конструктивні особливості, переваги та недоліки застосування сучасних FDM-принтерів, виявлено, що особливий інтерес становить принтери картезіанської схеми, а саме Prusa, Core-X та H-Bot. Використання цих схем є найбільш масовим в усіх сферах, конструкції дають змогу вести друк з високою точністю та якістю, відзначаються відносною простотою та надійністю. Саме 3D-принтери картезіанської схеми будуть використані для досліджень в подальшому.

1.4 Огляд та вибір матеріалу для дослідження FDM друку

На даний час на ринку витратних матеріалів для FDM друку представлено велика кількість різновидів термопластичного полімерного та композитного філаменту. До 80% ринку України займають вітчизняні виробники (U3DF – Ukrainian 3D Factory [29], м. Київ; MonoFilament [30], м. Київ; 3DPlast[31], м. Вишгород, Plexiwire [32], м. Харків), решта - закордонні (Verbatim, США; ColorFabb, Голландія; ESUN, Китай та інші).

Не дивлячись на велику кількість видів та виробників, серед споживачів особливо популярні лише наступні типи пластиків: ABS - акрилонітрил-бутадієн-стирол, PLA – полілактид, PET-G – поліетилентерефталат глікогель, HIPS - ударостійкий полістирол, а також PET – поліетилентерефталат та NYLON – нейлон. До 70% ринку приходять на PLA, ABS та PET-G.

Найширше використання отримав полілактид. Особливі характеристики даного матеріалу дозволяють застосовувати його не тільки в приватних цілях для виготовлення разових деталей та декоративних предметів, а і у промислових виробничих ланцюгах. Тому для більш детального вивчення процесу FDM 3D друку обрано саме PLA виробництва компанії U3DF – Ukrainian 3D Factory.

1.5 Огляд патентів конструкцій друкувальних головок FDM 3D принтерів

На сучасному етапі розвитку адитивних технологій існує велика кількість конструкцій FDM 3D принтерів. Кожна з них має свої переваги та недоліки. Проте певні конструктивні рішення та принципи друку являються найбільш успішними і використовуються в більшості пристроїв.

За останнє десятиліття в рамках ринку сформувалися ряд компаній по виготовленню FDM 3D принтерів. Кожна з них має свої унікальні ноу-хау та технічні рішення на які отримано промислові патенти. Також в патентних базах

світу є ряд цікавих винаходів, що отримані групами студентів та викладачів провідних університетів світу.

В [33] пропонується модернізація каналу екструдера. Для цього пропонується подовжити зону плавлення екструдера та встановити нагрівачі вздовж осі головки. Це дасть змогу більш краще проплавити витратний матеріал (філамент), а також використовувати різні полімерні матеріали в багатоекструдерній схемі (Fig.4). Проте таке рішення на даний момент не дістало поширення в комерційному обладнанні.

Схожим до [33] є патент [34], що описує сопловий модуль для 3D-принтерів, який містить механізм подачі прутка полімерного матеріалу, канал для приймання, нагрівальний блок, вентилятор охолодження та сопло.

У документі [35] описується загальний дизайн портативного 3D принтера. Одним із пунктів є конструкція друкувальної головки, що по суті є оптимізованим варіантом [34]. Схеми [33-35] по суті загальноприйняті і є типовими для більшості сучасних FDM 3D принтерів.

На даний час конструкції стандартних FDM 3D принтерів по суті досягнули піку своїх можливостей. Конкуренція між виробниками відбувається в полі дизайну, маркетингу, сервісного обслуговування та програмного забезпечення. Інженерних розробок нині особливо потребує обладнання, що може працювати з іншими класами матеріалів: композиційними, реактопластичними, силіконами і т.д. Клас таких пристроїв представлений слабо і кількість патентів доволі обмежений.

Великий інтерес викликає [36]. Патент описує двоекструдерну друкувальну головку, одна з яких є основною і подає полімерний матеріал, інша – допоміжна і служить для подачі волокнистого армуючого матеріалу (карбон, нейлон, арамід і т.д.). Така конструкція дозволяє отримувати композитні деталі з підвищеними механічними характеристиками. Такі принтери випускає компанія Markforged (власне їй і належить авторські права на патент), що нині є одним із світових лідерів в галузі виробництва FDM 3D принтерів.

Схожим є патент [37], де також використана багатоекструдерна схема, проте принциповим є те, що класична друкувальна головка створює зовнішній периметр виробу з термопластичного матеріалу, а у внутрішню порожнину подається реактопластична смола або композиція на її основі з екструдера з поршневою подачею. Схема є доволі перспективною, адже дозволяє розширити спектр витратних матеріалів, проте не є реалізованою у вигляді функціональних зразків.

1.6 Огляд досліджень механічних властивостей друківаних виробів

Основним принципом 3D друку являється нанесення розплавленого матеріалу на вже застиглий шар. Внаслідок чого утворюється об'єкт з неоднорідними (анізотропними) характеристиками. Тому інтерес представляє вивчення властивостей між шарами матеріалу. Для дослідження цього питання проводились випробовування друківаних зразків на міцність.

В роботі [38] випробовувались друківані та виготовлені методом лиття під тиском зразки з АБС пластику. Друківані зразки мали товщину шару 0.1, 0.15 та 0.2 мм. Випробовування проводились на розтяг вздовж напрямку шару, на згин поперек шару та на стискання вздовж шару.

При розтягу вздовж шару дещо вищі напруження на розтяг були для зразків з мінімальною товщиною шару ($\Delta_{шару} = 0,1$ мм) (рис. 1.21). При навантаженнях на згин виявлено чітку залежність, що при зростанні товщини шару збільшується максимально допустиме напруження.

Результати двох випробувань пояснюються орієнтацією молекул полімеру. При нанесенні матеріалу більш тонким шаром, полімерні ланцюги краще витягуються вздовж напрямку друку. Внаслідок цього виникає анізотропія властивостей зразків вздовж різних напрямків і чим тонший шар тим значення напружень вздовж і поперек шару мають більшу різницю. Випробовування на стискання показало, що граничні напруження вищі для більш товстих шарів.

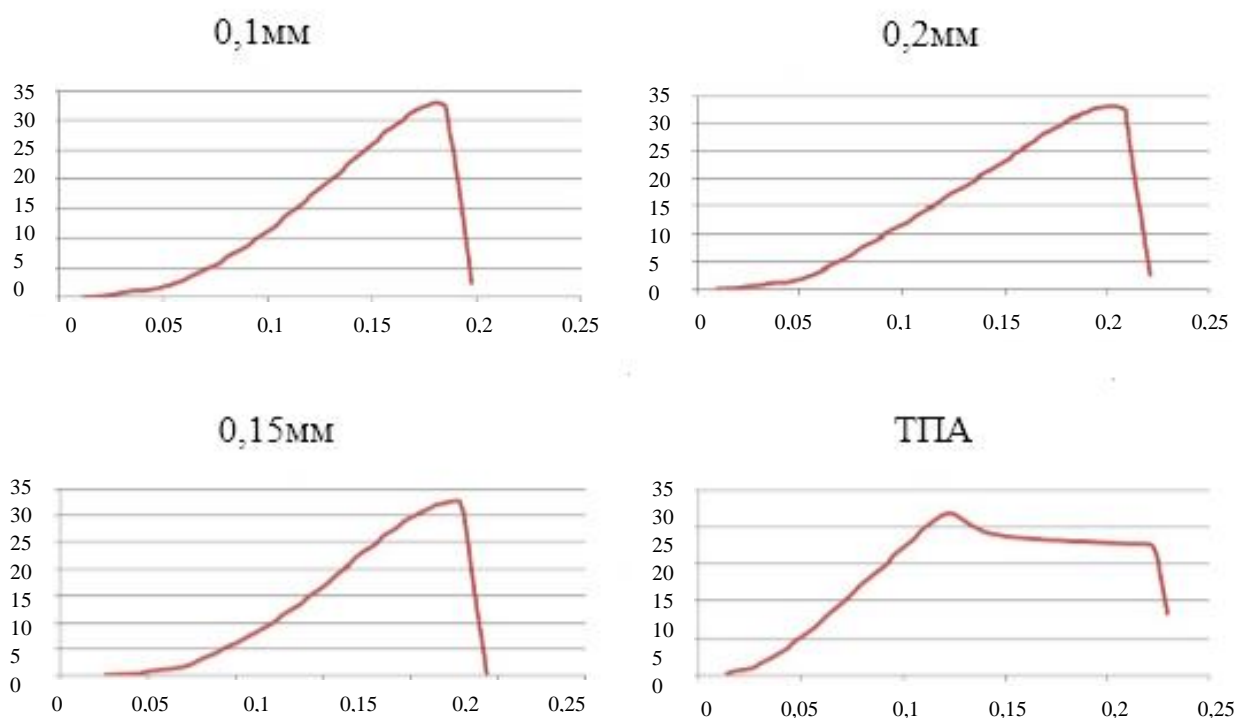


Рисунок 1.21 – Результати випробувань на розтяг зразків з різною товщиною шару [38]

В праці [39] досліджувались друківані зразки з ПЛА пластику. Для випробувань виготовлено дослідні зразки, в яких шари розташовувались під різним кутом до напрямку навантаження (0° , 45° та 90°). Всі зразки мають контурний шар.

Випробовування проводились на розтяг та на згин по 5 разів для кожного з типів зразків. Виявилось, що найбільше середнє значення максимального напруження для зразків у яких шари розташовані під 45° до напрямку навантаження (рис. 1.22). Також було проведено випробовування на розтяг витратного матеріалу (філаменту). Результати показали, що максимальне значення напруження менше за максимальне для друківаних зразків.

Дане дослідження показує вплив схеми суцільного заповнення виробів на міцність. Проте, наявність контурного шару вносять певні неточності в дослідження.

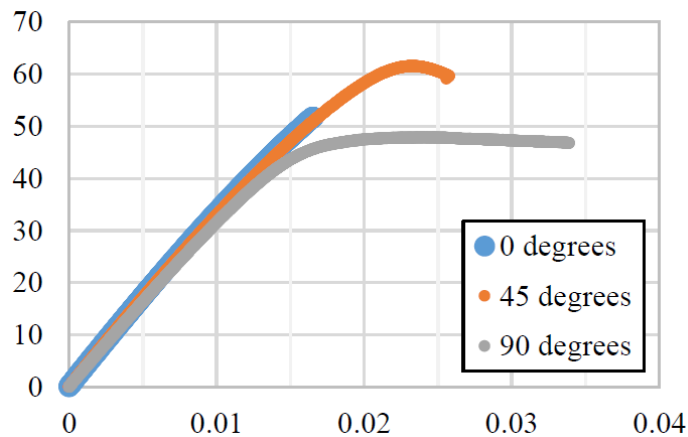


Рисунок 1.22 – Результати випробувань на розтяг зразків з різною орієнтацією шарів відносно напрямку навантаження [39]

Дослідження [40] проводилися над найбільш популярними марками пластиків PLA, ABS, PETG, Nylon, ASA, PC/ABS. Для кожного з пластиків були виготовлені зразки з різним заповненням 15,30,50,75,90 та 100%. Схема заповнення мала вигляд трикутних комірок. Всі зразки мають контурний шар.

Результати випробувань (рис. 1.23) показали найміцніші марки пластиків та те, що при заповненні на 100%, зразки мають найвищу межу міцності на розтяг. Найцікавішим є те, що для інших ступенів заповнення, відсутня прямопропорційна залежність від міцності. Дане дослідження є корисним для встановлення оптимального співвідношення між міцнісними характеристиками деталей та їх масою. Для прикладу, зразки з PLA пластику з заповненням 30% є найбільш оптимальними по міцнісним характеристикам.

Отримані результати дають змогу зменшити витрату матеріалу, а отже і час виготовлення. Проте, дослідження є дуже вибіркоким, тести проводились над зразками однієї схеми заповнення та навантажувались зусиллям на розтяг. Результати можна використовувати тільки при виготовленні деталей типу “стержень”, що працюють на розтяг.

Зразки, що виготовлялись для тестів [41] схожі зі зразками для [39]. Так само було використано PLA пластик, але внутрішнє заповнення було під кутами 0°, 30° та 60°. Також друк відбувався при швидкості екструдера 30 мм/с; 50 мм/с та 70 мм/с; температурі екструдера - 190°C, 200°C та 210°C.

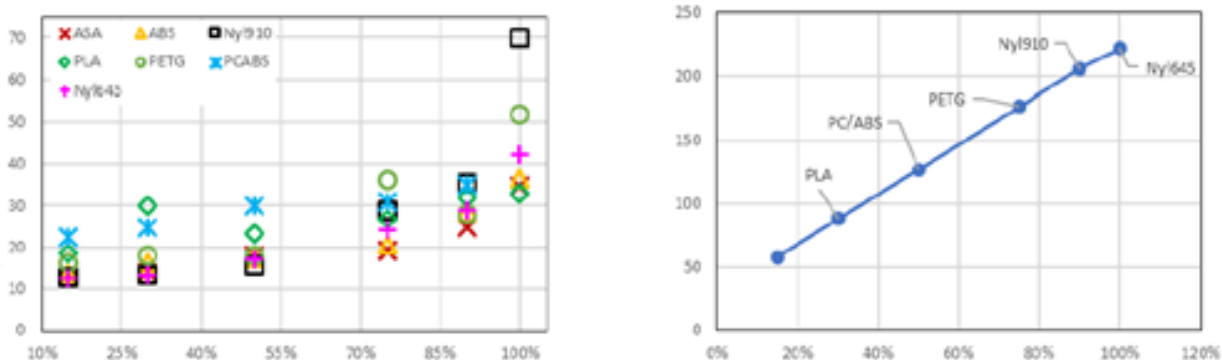


Рисунок 1.23 – Результати випробувань на розтяг зразків з різним заповненням [40]

Всього було виготовлено 17 типів зразків з різною комбінацією параметрів друку. В абсолютному вираженні значення максимального напруження розтягу були в межах від 15,8 МПа до 23,6 МПа. Для обробки результатів було використано дисперсійний аналіз, що визначає вплив кожного з параметрів (факторів) друку.

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^{i=k} B_i X_i + \sum_{i=1}^{i=k} B_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} B_{ij} X_i X_j,$$

де Y – невідома, B – фактор, k – кількість факторів.

Отримані залежності показали вірогідність впливу кожного з факторів, проте не було встановлено точної причини такого впливу (рис. 1.24).

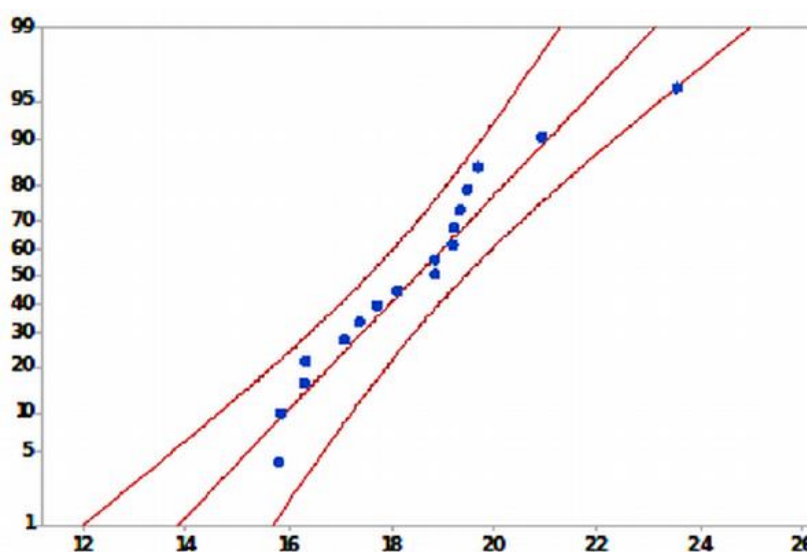


Рисунок 1.24 – Залежність вірогідності впливу параметрів друку на міцність зразків [41]

У дослідженнях [42] порівнювались міцнісні характеристики зразків з різною густиною та схемою заповнення. Густина заповнення була 0, 15, 20 та 100%. Внутрішня сітка мала прямі квадратні комірки, квадратні комірки під кутом 45°, рівно- та нерівносторонні гексагони. Було встановлено залежність міцності від схеми внутрішнього заповнення (рис. 1.25). Окрім натурних випробувань, були проведені числові розрахунки методом скінченних елементів.

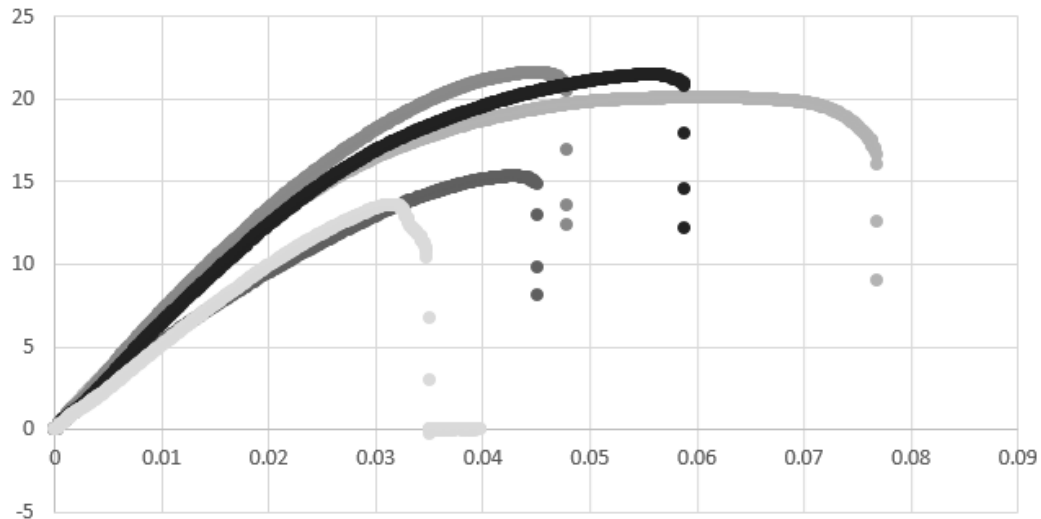


Рисунок 1.25 – Результати випробувань на розтяг зразків в залежності від густини та схеми заповнення [42]

Певний інтерес являє дослідження мультиматеріальних зразків [43]. Для цього було обрано три матеріали ABS, PLA та HIPS. На багатоекструдерному 3D принтері було надруковано ряд зразків товщиною 12 шарів (товщина одного шару 0,27 мм). Особливістю є те, що кожні 4 шари змінювався тип витратного матеріалу. Також змінювалися порядок нанесення матеріалів, густина заповнення (60, 80 та 100%) та швидкість друку 50, 60 та 70 мм/с.

Всього було виготовлено 9 зразків при різних комбінаціях технологічних параметрів друку (порядок нанесення матеріалів, густина заповнення та швидкість друку). Виявлено, що загальна міцність зразка менша за міцність найміцнішого складового матеріалу (рис. 1.26), проте більша за міцність найслабшого в композиції.

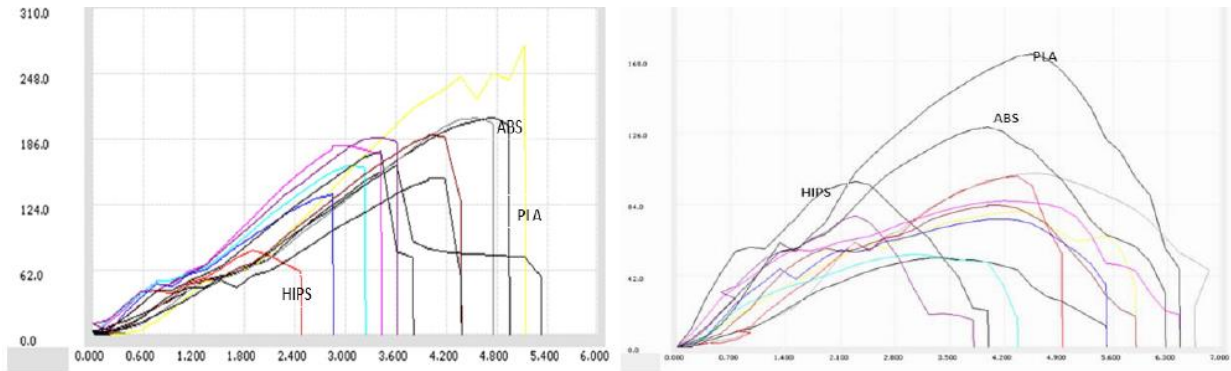


Рисунок 1.26 – Результати випробувань на розтяг мультиматеріальних зразків [43].

Дослідження [44] проводилось над зразками друкowanими з PLA. Для виготовлення були використані сопла діаметрами $d_{\text{сопла}} = 0,4; 0,6$ та $0,8$ мм. Друк для кожного діаметра сопла вівся з різною товщиною шару $\Delta_{\text{шару}}$ (від $0,06$ до $0,6$ мм). В статті наведені мікрознімки перерізу друкowanих зразків (рис. 1.27), що дають картину укладання шарів різної товщини.

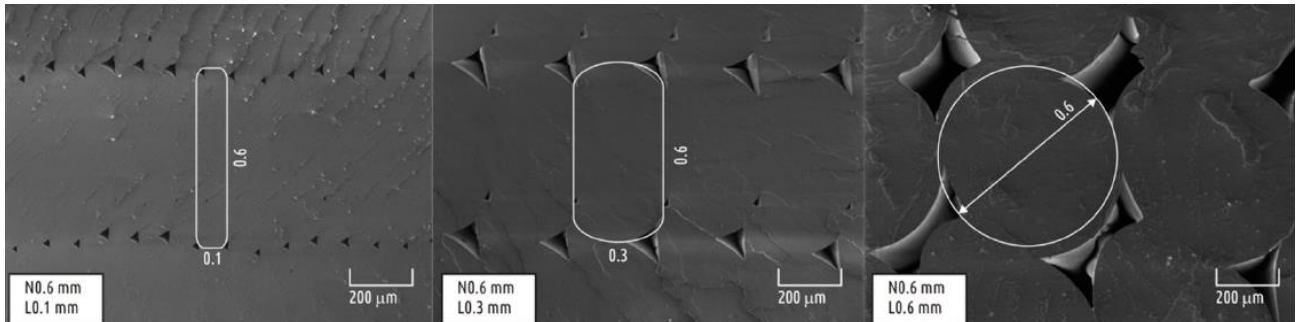


Рисунок 1.27 – Мікрознімки розрізу зразків надрукowanих соплом $d_{\text{сопла}}=0,6$ мм та товщинами шару $\Delta_{\text{шару}} = 0,1; 0,3$ та $0,6$ мм [44]

На відміну від попередніх, дослідження [44] показало пряmolінійну залежність між товщиною шару та максимальним напруженням на згин (рис. 1.28 а). Також особливий інтерес становить визначення залежності міцності зразків $[\sigma_{\text{згин}}]$ до відношення r діаметра сопла $d_{\text{сопла}}$ до товщини шару $\Delta_{\text{шару}}$:

$$\sigma = \sigma_{\text{max}} - \frac{58,19}{(r^{1.5})},$$

де σ_{max} – максимально експериментальне напруження розтягу, МПа; число 58,19 коефіцієнт апроксимації експериментальних даних.

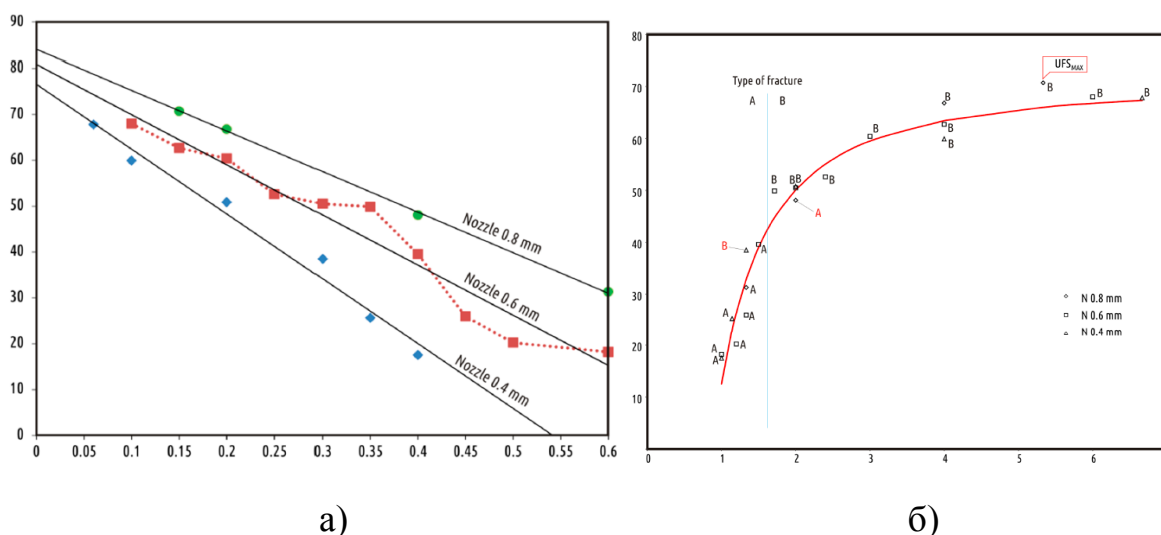


Рисунок 1.28 – Межа міцності на згин в залежності від товщини наплавленого шару до різних діаметрів сопла (а), відносно відношення висоти діаметра сопла до товщини шару (б) [44]

Встановлено, що зі зменшенням висоти шару стрімко зростає міцність зразків на згин, проте при наближенні висоти шару до 20 % від діаметра сопла, зростання міцності практично зупиняється і не досягає межі міцності аналогічних зразків виготовлених методом лиття під тиском (рис. 1.28 б). Це означає, що майже неможливо повторити суцільну заповненість поперечного перерізу та те, що вироби виготовлені методом 3D друку, внаслідок своєї структури, мають відмінні механічні властивості.

1.7 Висновки і завдання досліджень

Проведений розгляд різноманітних джерел показав, що на сучасному етапі розвитку адитивних технологій існує безліч пристроїв, що дають змогу створювати об'єкти з основних конструкційних матеріалів методом просторового друку: Для подальшого розвитку галузі полімерного переробного обладнання особливий інтерес становить технологія FDM, що використовує полімерну термопластичну сировину.

Огляд конструкцій пристроїв даної технології показав, що галузь стрімко розвивається і має експоненційний ріст, ринок обладнання представлений

десятками компаній з різних частин світу, що виділяють великі бюджети на розробку нових конструкцій та створення нового програмного забезпечення для керування та постобробки 3D моделей.

В той же час сам процес формування виробів вивчений досить слабо, майже невивченим є процес впливу характеристик 3D принтера на механіко-фізичні, геометричні, візуальні параметри друкованого об'єкту. На основі розглянутих джерел, встановлено, що:

- дослідження друкованих зразків переважно не мають комплексного підходу, а розглядають лише деякі параметри друку і часто ті, що не є основними;
- дослідження не дають змогу встановити величину та характер міжшарової адгезії, адже зразки для дослідів виготовляють з контурним шаром та з різною схемою та густиною заповнення;
- практично відсутнє вивчення конструкцій обладнання та його вплив на продуктивність та якість друку;
- практично невивченим є стан полімерного матеріалу після виходу з друкувальної головки та його вплив на якість майбутнього виробу;
- внаслідок насичення ринку, спостерігається тенденція орієнтації виробників на спрощення та оптимізацію існуючого обладнання, результатом чого є недостатнє приділення уваги до створення нових методів друку та розширенню існуючого спектру витратного матеріалу.

Таким чином, відсутнє комплексне дослідження, що вивчає характер та величину міжшарової взаємодії, вплив на неї основних параметрів просторового друку, а також є невивченим процес охолодження екструдованого матеріалу та його вплив на геометрію виробу.

За результатами огляду сучасного стану технології просторового друку опубліковано статтю в фаховому журналі та зроблено доповідь на науково-практичній конференції [45].

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

В розділі описано основні процеси, що відбуваються в класичному принтері на основі технології FDM, починаючи від властивостей полімерної стренги в каналі екструдера, до її нанесення на платформу і взаємодію між нанесеними шарами полімеру, а також описано теплові та інші процеси.

2.1 Розв'язуючі рівняння течії полімеру

В'язка поведінка розплаву термопластичного полімеру в екструдері має вирішальне значення для опису його роботи на виході з сопла:

Розглядаємо задачу течії полімеру в каналі друкувальної головки за таких припущень:

- процес екструзії стаціонарний;
- течія розплаву – неізотермічна;
- полімер нестисливий ($\rho = \text{const}$);
- сили інерції нехтовно малі порівняно з силами в'язкості: $\text{Re} \ll 1$;
- швидкість на стінці дорівнює нулю: $v|_{\text{стінки}} = 0$.

Математичну модель екструзії утворює система рівнянь нерозривності, руху та енергії (2.1 – 2.3):

– рідина нестислива ($\rho = \text{const}$), тому рівняння нерозривності запишеться у вигляді:

$$-\rho \operatorname{div}(\mathbf{v}) = 0 \quad (2.1)$$

Рівняння руху:

$$\nabla \cdot \hat{\sigma} + \vec{f} = \rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \vec{v} \right) \quad (2.2)$$

Рівняння збереження енергії:

$$c \frac{dT}{dt} = \vec{\nabla} \cdot (\lambda_T \vec{\nabla} T) + \hat{\sigma} \cdot \hat{\xi} + Q_{(v)}, \quad (2.3)$$

де ρ – маса одиниці об'єму (густина) матеріалу, кг/м³; \vec{v} – вектор швидкості точки тіла, м/с; $\hat{\sigma}$ – тензор напружень, Па; \vec{f} – вектор зовнішньої сили, що діє на одиницю об'єму тіла, Н/м³; $\vec{\nabla}\vec{v}$ – градієнт вектора швидкості, м/с; $Q_{(v)}$ – швидкість зовнішнього об'ємного притоку тепла, віднесена до одиниці маси, Дж/кг.

Апроксимація закону в'язкості здійснювалась за законом:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + (\lambda\dot{\gamma})^{n-1}} \quad (2.4)$$

де η_0 – в'язкість за нульової швидкості зсуву, Па·с; λ – час релаксації, с; n – показник степеню. За усталеної зсувної одновісної течії локальна швидкість зсуву зменшується до градієнта швидкості.

Також слід враховувати температурну залежність в'язкості, оскільки матеріал перебуває в неізотермічних умовах, протікаючи крізь екструдер та сопло з послідуочим охолодженням:

$$\eta = H(T)\eta_{T_0}(\dot{\gamma}), \quad (2.5)$$

Залежна величина градієнту швидкості зсуву – це вираз закону в'язкості з придатними параметрами, які оцінюються за деякої контрольної температури T_0 . Для температурної залежності була використана модель Арреніуса:

$$H(T) = \exp \left[a \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (2.6)$$

де a – енергія активації, Дж, T_0 – контрольна температура, К.

Граничні умови:

$$- \begin{cases} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = v_0; \\ T = T_0, \end{cases} \quad - \text{ на вихідному перерізі потоку рідини задаються його}$$

нормальна швидкість і температура;

$$- \begin{cases} \bar{\nabla} p = 0; \\ \bar{\nabla} T = 0. \end{cases} - \text{ на перерізі витоку рідини задаються нульові значення}$$

градієнтів тиску і температури.

На бічній стінці приймаємо граничні умови третього роду:

$$n \cdot q = \alpha(T - T_w),$$

де n – напрям нормалі до стінки; q – поточний тепловий потік; α – коефіцієнт тепловіддачі; T – поточна температура; T_w – температура стінки.

2.2 Оцінка теплового потоку

Перший закон термодинаміки стверджує, що тепла енергія зберігається. Виходячи з цього визначення, контрольний об'єм можна визначити як

$$\rho c \left(\frac{\delta T}{\delta t} + \{v\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T \{q\} \ddot{q}, \quad (2.7)$$

де ρ – густина, кг/м³, c – питома теплоємність, Дж/кг^{°C}, T – температура як функція $T(x, y, z, t)$, К, t – час, с.

$$\{L\} = \begin{Bmatrix} \frac{d}{dx} \\ \frac{d}{dy} \\ \frac{d}{dz} \end{Bmatrix} - \text{векторний оператор, } \{v\} = \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{Bmatrix} - \text{вектор швидкості масового}$$

переносу тепла, $\{q\}$ – вектор теплового потоку; \ddot{q} – коефіцієнт тепловіддачі на одиницю об'єму.

Вираз $\{L\} T$ і $\{L\}^T \{q\}$ може інтерпретуватися як $\nabla \cdot T$ і $\nabla \cdot \{q\}$ відповідно, де ∇ – градієнт, а $\nabla \cdot$ – дивергенція.

Далі застосовуємо закон Фур'є, який пов'язує вектор потоку тепла з тепловим градієнтом:

$$\{q\} = -[D]\{L\}T, \quad (2.8)$$

де

$$[D] = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} - \text{матриця теплопровідності,}$$

K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} – теплопровідність в напрямках x , y та z .

Поєднуючи рівняння (2.7) та (2.8) отримуємо:

$$\rho c \left(\frac{\delta T}{\delta t} + \{v\}^T \{L\} T \right) = \{L\}^T ([D] \{L\} T) + \ddot{q} \quad (2.9)$$

Розширюючи рівняння (2.9) до його більш звичної форми отримуємо:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \ddot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.10)$$

Припускаємо, що всі ефекти можна описати у глобальній декартовій системі координат.

Розглянемо три типи граничних умов. Передбачається, що вони охоплюють весь елемент.

1. Задані температури, що діють на поверхню S_1 :

$$T = T^*, \quad (2.11)$$

де T^* - задана температура.

2. Заданий тепловий потік через поверхню S_2 :

$$\{q\}^T \{\eta\} = -q^*, \quad (2.12)$$

де $\{\eta\}$ – одиничний вектор зовнішньої нормалі; q^* - заданий тепловий потік.

3. Задані конвективні поверхні, що діють над поверхнею S_3 (закон охолодження Ньютона):

$$\{q\}^T \{\eta\} = c(T_S - T_B), \quad (2.13)$$

де h_f – коефіцієнт поверхні, що обчислюється як $(T_B + T_S)/2$, якщо для елемента не вказано інше; T_B – масова температура дотичної рідини; T_S – температура на поверхні моделі.

Заданий позитивний тепловий потік потрапляє на межу (тобто в напрямку, протилежному $\{\dot{\eta}\}$), що пояснює негативний знак в рівнянні (2.12 – 2.13).

Поєднуючи рівняння (2.8) з (2.12) та (2.13) отримуємо:

$$\{\eta\}^T [D] \{L\} T = q^*, \quad (2.14)$$

$$\{\eta\}^T [D] \{L\} T = h_f (T_B - T). \quad (2.15)$$

Помноживши рівняння (2.9) на фактичну зміну температури, інтегрувавши по об'єму елемента і поєднавши з рівнянням (2.15) і рівнянням (2.16) отримуємо:

$$\int_{vol} \left(\rho c \delta T \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T (\delta T) ([D] \{L\} T) \right) d(vol) =$$

$$\int_{S_2} \delta T q^* d(S_2) + \int_{S_3} \delta T h_f (T_B - T) d(S_3) + \int_{vol} \delta T \ddot{q} d(vol) \quad (2.16)$$

де vol – об'єм елемента; δT – допустима фактична температура.

2.3 Розташування фронту розплаву

Нагрівання плівок згідно з працею [46] описано двовимірною (2D) осесиметричною стаціонарною моделлю провідності, припускаючи постійну витрату та температуру стінки. Безпосереднє вирішення цієї задачі наводиться за залежністю:

$$\theta = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-\lambda_n^2 z') \frac{\zeta_0(\lambda_n r')}{\lambda_n \zeta_1(\lambda_n)}, \zeta_0(\lambda_n) = 0, \quad (2.17)$$

де θ – безрозмірна температура, r' і z' – безрозмірні радіус та довжина, і визначаються як:

$$\theta = \frac{T - T_0}{T_2 - T_0}, r' = \frac{r}{r_f}, \text{ та } z' = \frac{\alpha z}{\nu r_f^2}, \quad (2.18)$$

де T – температура розігріву в деякій точці (r, z) , К; T_0 – температура стінки, К; T_2 – температура стренги на вході екструдера ($z = 0$), К; r_f – радіус стренги, м; α – коефіцієнт температуропровідності стренги, м²/с; ν – швидкість стренги, м/с; λ_n – корінь функції Бесселя нульового порядку першого роду (ζ_0), а ζ_1 – функція Бесселя першого порядку першого роду.

2.4 Оцінка падіння тиску

Падіння тиску в кожній ділянці екструдера згідно з цією моделлю дається відповідно:

$$\Delta P_1 = 2L_1 \left(\frac{\nu}{\phi}\right)^{\frac{1}{m}} \left(\frac{m+3}{\left(\frac{D_1}{2}\right)^{m+1}}\right)^{\frac{1}{m}} \exp\left[\alpha\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_\alpha}\right)\right], \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_2 = & \left(\frac{2m}{3 \tan\left(\frac{\beta}{2}\right)}\right) \left(\frac{1}{D_2^{\frac{3}{m}}} - \frac{1}{D_1^{\frac{3}{m}}}\right) \times \left(\left(\frac{D_1}{2}\right)^2 (m+3) 2^{m+3}\right)^{\frac{1}{m}} \\ & \times \exp\left[\alpha\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_\alpha}\right)\right], \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\Delta P_3 = 2L_3 \left(\frac{v}{\phi}\right)^{\frac{1}{m}} \left(\frac{(m+3)\left(\frac{D_1}{2}\right)^2}{\left(\frac{D_2}{2}\right)^{m+3}}\right)^{\frac{1}{m}} \exp\left[\alpha\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_\alpha}\right)\right] \quad (2.21)$$

де L_1, L_2, D_1 та D_2 розміри, що відповідають рис. 2.1, $m; \beta$ – кут конічної ділянки сопла екструдера, рад; а m і ϕ є параметрами, що відповідають коефіцієнтам степеневого рівняння [47-50].

Загальний перепад тиску в екструдері – сума падіння тиску в кожній ділянці:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 \quad (2.22)$$

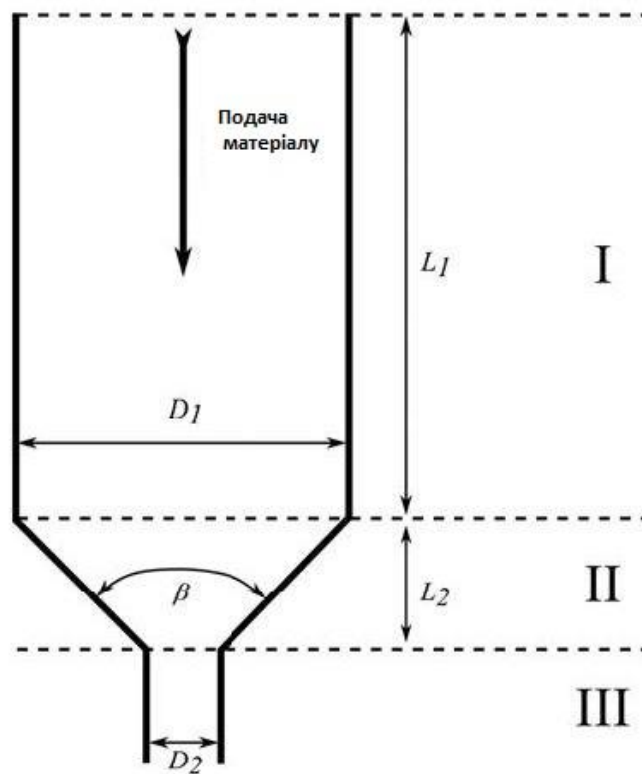


Рисунок 2.1 – Канал екструдера розділений на три зони

2.5 Розширення і охолодження краплі розплаву

У головці екструдера розплав полімеру знаходиться під напруженням, де частина енергії деформації зберігається еластичною [50]. Коли розплав полімеру

виходить із сопла головки, вільна межа розплаву полімеру дозволяє краплі полімеру швидко приймати профіль швидкості потоку, тобто постійну у радіальному напрямку швидкість [47].

Коли розплав полімеру більше не стримується стінками каналу, напруження, що діють на розплав у соплі, вивільняються і збережена еластична енергія вивільняється, що призводить до радіального розширення розплаву, як показано на Рисунок 2.2 [50]. Коли розплав виходить з екструзійного сопла, він також піддається конвективному охолодженню від повітря, що рухається в середовищі друку.

Белліні [47] моделював конвективне охолодження, беручи до уваги коефіцієнт теплопередачі $h = 20 \text{ Вт/м}^2\text{К}$. Процес конвективного охолодження затримується шляхом теплопровідності від розплаву в екструдері, який під'єднаний до екструдованої краплі [47]. Автор [47] отримав дещо несподіваний на перший погляд результат: чим більша теплопровідність розплаву, тим повільніше кулька охолоджуватиметься на виході з екструзійного сопла.

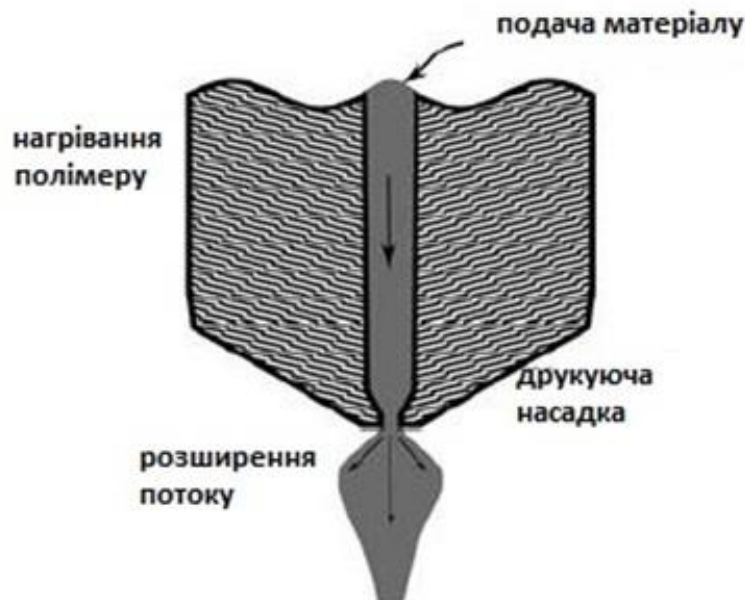


Рисунок 2.2 – Розширення на соплі в процесі екструзії

2.6 Осадження та стабілізація краплі

Протікання розплаву крізь сопло (ділянка III на рис. 2.1), моделюється як простий потік Хаген-Пуазейля, об'ємний потік Q , [50]:

$$Q = \frac{\pi \left(\frac{D_2}{2}\right)^4 \Delta P}{8\eta L_2}. \quad (2.23)$$

Площа поперечного перерізу (A) стренги буде обернено пропорційно швидкості сопла (v_{print}):

$$A = \frac{Q}{v_{print}}. \quad (2.24)$$

Якщо швидкість сопла є достатньо великою, витікання стає нестабільним і переривчастим. Оскільки максимальна швидкість, для якої крапля залишається стабільною та безперервною, наближення описується як подібне до вісесиметричного рідкого потоку, що дозволяє оцінити максимальну швидкість сопла [50-52]:

$$v_{print} = \frac{Q\pi}{h^2}, \quad (2.25)$$

а також мінімальна площа поперечного перерізу [50-52]:

$$A_{min} = \frac{h^2}{\pi}, \quad (2.26)$$

де h - висота отвору сопла, м; l_{kz} - висота сопла над поверхнею друку, м.

2.7 Охолодження шару та зв'язування полімерів

Міцність екструдованої частини розплаву буде суттєво обмежена силою зв'язку між сусідніми краплями матеріал. Ця сила зв'язків буде функцією енергії адгезії/когезії, яка частково залежить від області контакту між нитками полімеру.

Необхідною умовою процесу спікання є те, що температура полімеру перевищує температуру кристалізації, T_g . При виході з сопла розплав значно перевищує цю температуру; однак середовище друку значно нижче T_g . Тепло від матеріалу, що виходить з сопла, збільшує температуру шару, який наноситься на поверхню T_g , щоб забезпечити зв'язування. Отже, теплопровідність та теплоємність матеріалів відіграють ключову роль у визначенні життєздатних умов експлуатації процесу. Тепло втрачається з нанесеного шару через провідність до матеріалу нижче і конвекції до навколишнього повітря в середовищі друку (рис. 2.3).

Кілька моделей розроблено для прогнозування термічної історії нанесеного шару. Томас і Родрігес представили спрощену 2D термічну модель, яка розглядала нанесені нитки полімеру як прямокутну форму [53]. Результируюче рівняння для температури розігріву, усереднене по ширині нитки, для висоти H та ширини W становить:

$$T_{ave}(x, y, t) = T_E \left[1 + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (a_{mn} \sin(\lambda_m y) \cos(\beta_n x)) \times \right. \\ \left. \times \exp\left(-\left(\frac{k}{C_p}\right)^2 (\lambda_m^2 + \beta_n^2) t\right) \right], \quad (2.27)$$

де

$$a_{mn} = \frac{4T_L^*}{E_m^2 F_n^2 \lambda_m \beta_n} \sin\left(\frac{9\lambda_m H}{2}\right) \sin\left(\frac{\lambda_m H}{2}\right) \sin\left(\frac{\beta_n W}{2}\right), \quad (2.28)$$

$$E_m^2 = \frac{1}{2} \left(5H - \frac{\sin(10\lambda_m H)}{2\lambda_m} \right), \quad (2.29)$$

$$F_n^2 = \frac{1}{2} \left(\omega - \frac{\sin(\lambda_n \beta_n W)}{\beta_n} \right), \quad (2.30)$$

де t , C , k та ρ – час, теплоємність, теплопровідність та густина відповідно, а власними значеннями є корінь рівнянь [53]:

$$\lambda_m \cot(5\lambda_m H) = -\frac{h}{k}, \quad (2.31)$$

та

$$\beta_n \tan\left(\frac{\beta_n W}{2}\right) = \frac{h}{k}, \quad (2.32)$$

$$\rho C A v \frac{\partial T}{\partial x} = A \frac{\partial \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} - h P (T - T_\infty), \quad (2.33)$$



Рисунок 2.3 - Взаємодія друкувальної голівки з екструдованим шаром

Це спростило керуючі рівняння для одновимірного перехідного рівняння теплопередачі аналітичним рішенням якого є:

$$T = T_{\infty} + (T_0 + T_{\infty}) \exp\left(\frac{(1 - \sqrt{1 + 4\alpha\eta})vt}{2\alpha}\right), \quad (2.34)$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_v}, \text{ та } \beta = \frac{hP}{\rho CAv} \quad (2.35)$$

Цей підхід має перевагу простоти, але не дозволяє передбачити будь-яку локальну неоднорідність температури всередині нитки матеріалу.

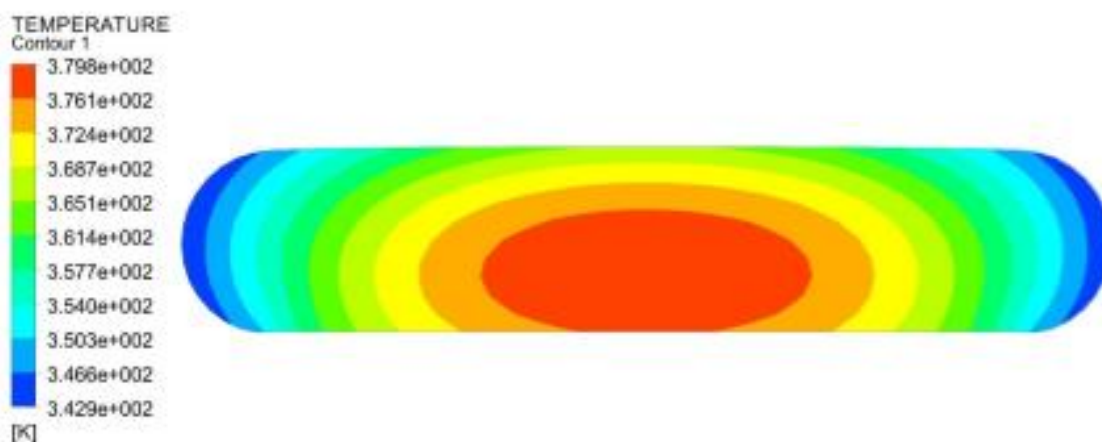
2.8 Моделювання охолодження та деформування шару полімеру

Міцність виробу вздовж шарів буде вищою, аніж у поперечному напрямку. Це пов'язано з міцністю контакту шарів, яка менша міцності суцільного полімеру, та з формою самих шарів, які не повністю заповнюють переріз.

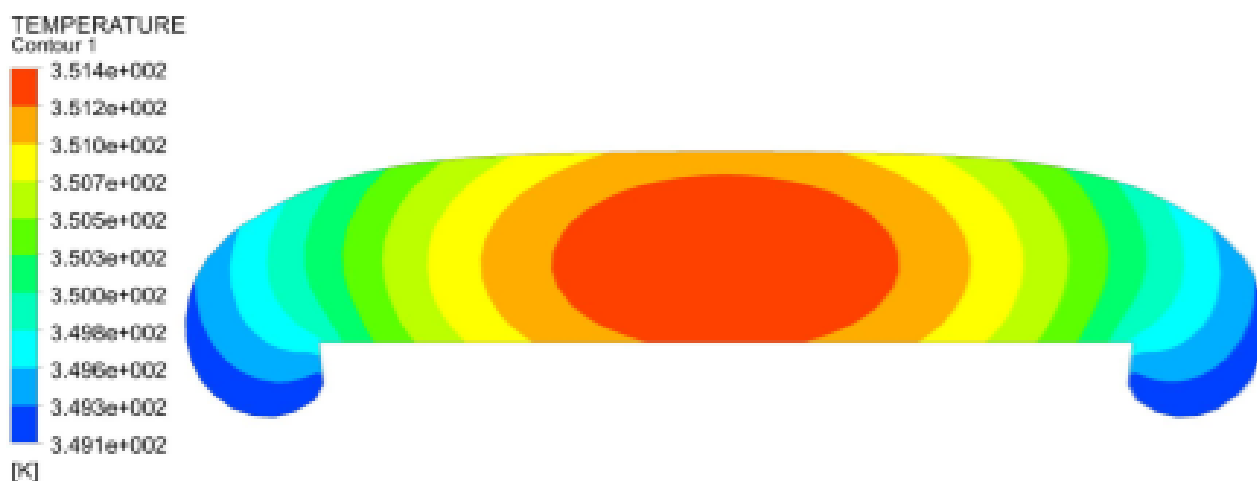
Для моделювання деформування шару полімеру під дією власної ваги з одночасним охолодженням після нанесення на попередній шар розв'язувалась зв'язана термомеханічна задача з урахуванням степеневі залежності в'язкості полімеру від швидкості деформації та законом Арреніуса залежності в'язкості від температури.

Початковими умовами була температура та форма шару полімеру, а граничними – теплові граничні умови II-го роду Конвективна тепловіддача розраховувалась із умови інтенсивного обдуву з двох боків. Як перероблюваний матеріал передбачався полілактид (PLA). Моделювання здійснювалось у середовищі Ansys Poliflow. Діаметр сопла приймався 1 мм, а товщина шару 0,2 мм.

Розподіл температур в ізолініях та форма шару після 1 с інтенсивного обдуву з коефіцієнтом тепловіддачі $\alpha = 250 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ та після 7 с без обдуву з $\alpha = 25 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ показано на Рис. 2.4.



а



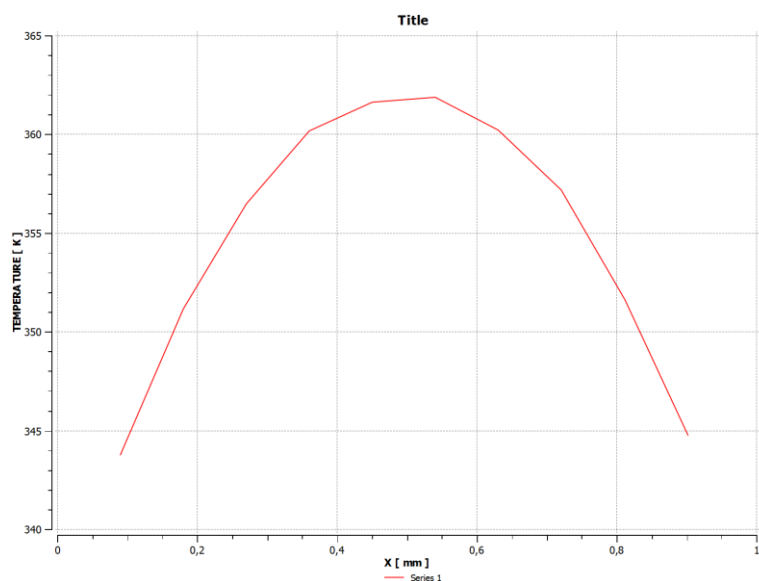
б

- а – після часу 1 с з коефіцієнтом тепловіддачі $\alpha = 250 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;
 б – після часу 7 с з коефіцієнтом тепловіддачі $\alpha = 25 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

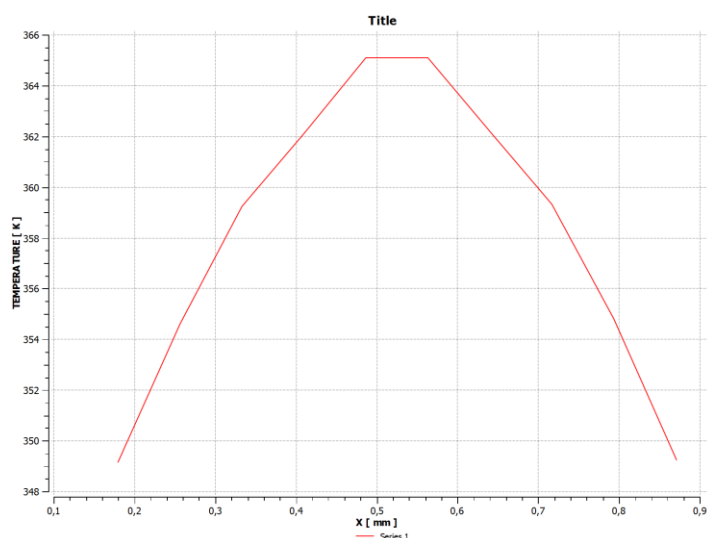
Рисунок 2.4 – Розподіл температур та форма шару за різних умов охолодження

З рис. 2.4 витікає, що за умов інтенсивного обдуву полімер менш ніж за 1 с встигає охолодитись до температур, нижчих за температуру текучості без помітних деформацій. Водночас в другому випадку шар встиг втратити форму до охолодження. Це означатиме погіршення розмірної точності та майбутню температурну деформацію виробу.

Розподіл температур на верхніх поверхнях шару в першому з розглянутих випадків за різної товщини шару показано на рис. 2.5.



а



б

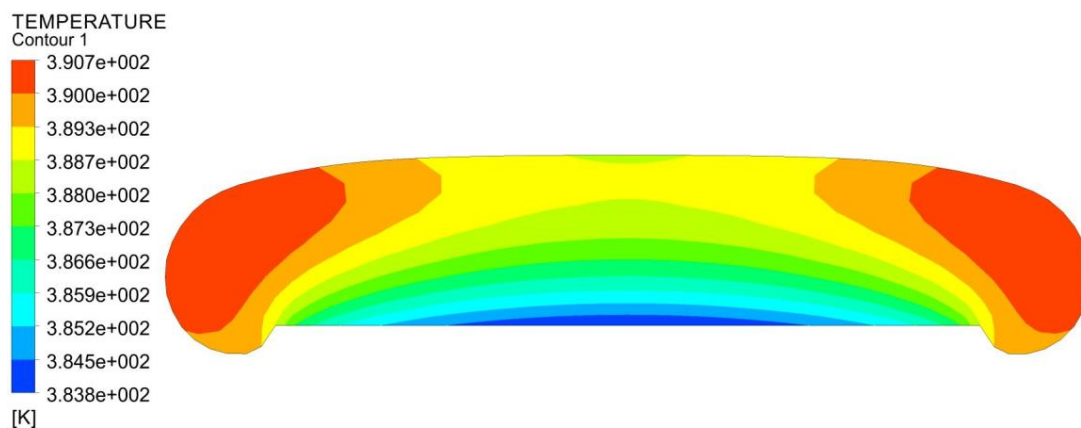
а – товщина 0,2 мм; б – товщина 0,4 мм

Рисунок 2.5 – Розподіл температур на верхніх поверхнях за умов інтенсивного обдуву за різної товщини шару

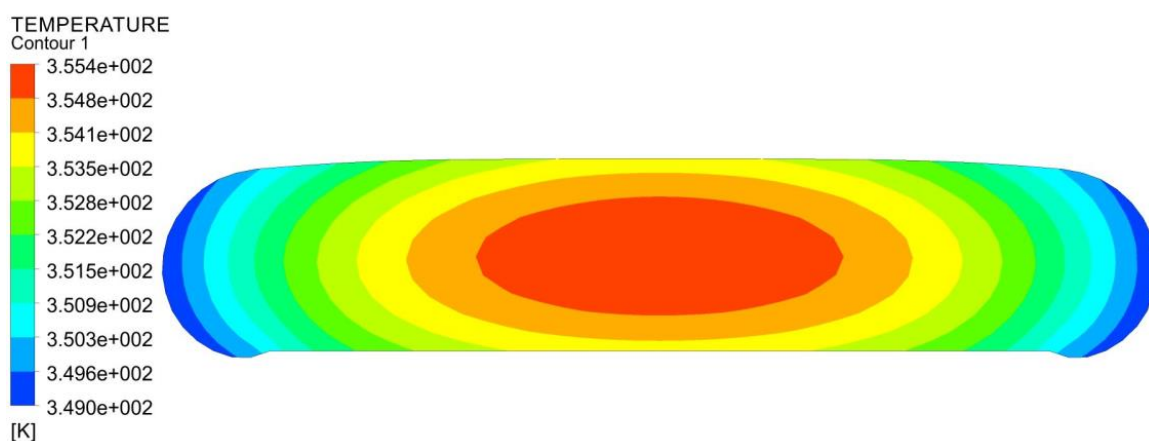
Результати моделювання показують, що температура на верхній поверхні перед нанесенням наступного шару за товщини 0,2 мм перебуває в межах від 70 до 90 °С, а за товщини 0,4 мм – від 76 до 92°С. Для недопущення короблення та розшарування виробів ця температура не має виходити за межі 70°С, що свідчить

про те, що проміжок часу до нанесення наступного шару повинен бути більшим 2-3 с. Це накладає обмеження на допустиму швидкість роботи 3D-принтера.

На рис. 2.6 показано розподіл форми та температур шару товщиною 0,2мм за різних умов. Початкова температура складала 220 °С.



а



б

а – за час 2 с з коефіцієнтом тепловіддачі $\alpha = 20 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

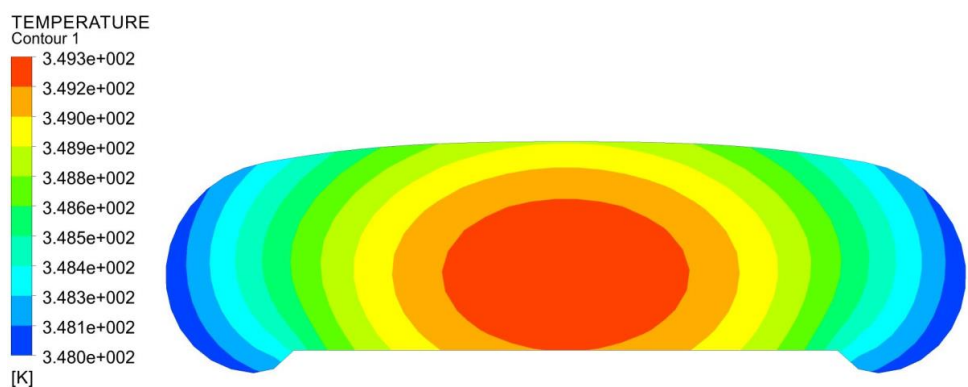
б – за час 1,5 с з коефіцієнтом тепловіддачі $\alpha = 100 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

Рисунок 2.6 – Розподіл температур та форма шару

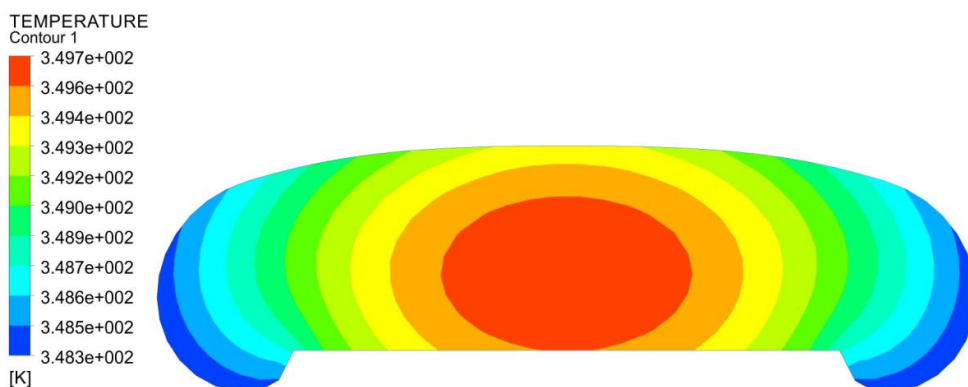
Діапазон температур поверхні в випадку а складає 387–390 К, а у випадку б – 350–354 К.

Також були проведені дослідження впливу початкової температури на розподіл температури та форми шару полімеру після певного часу охолодження.

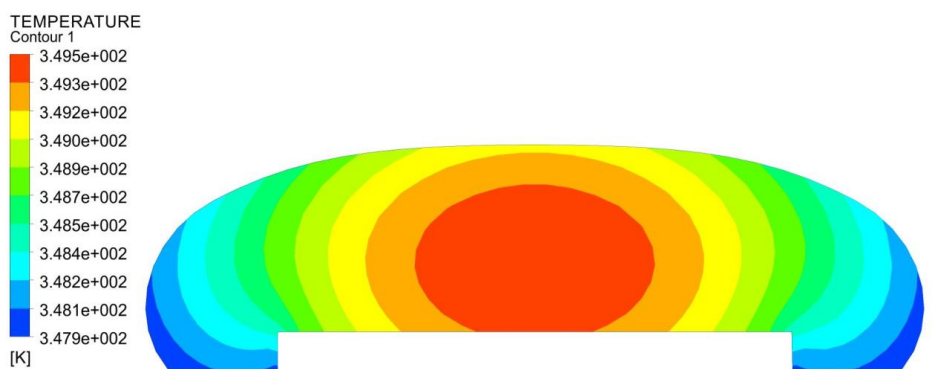
Досліди проведено для шару товщиною 0,3 мм після часу 7 с з коефіцієнтом тепловіддачі $\alpha = 25 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ (без обдуву). Результати показано на рис. 2.7.



а



б



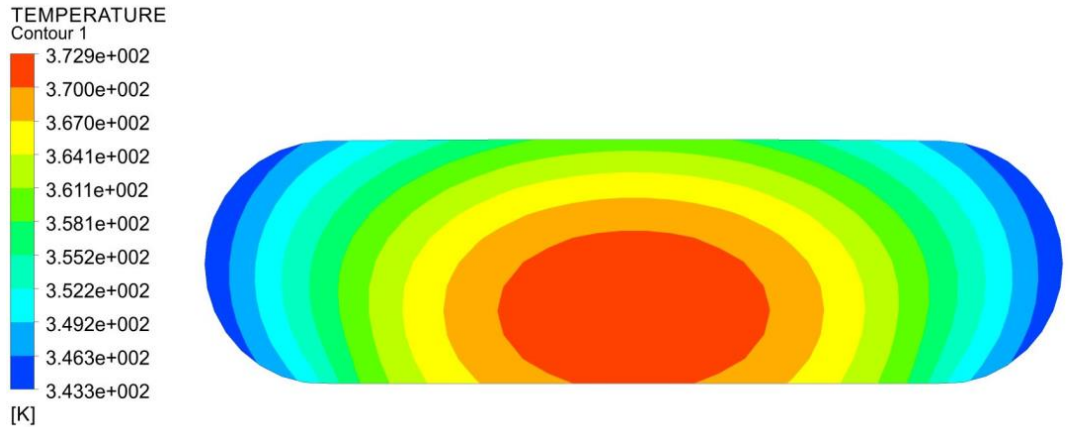
в

а $-200 \text{ }^\circ\text{C}$; б $-210 \text{ }^\circ\text{C}$; в $-220 \text{ }^\circ\text{C}$

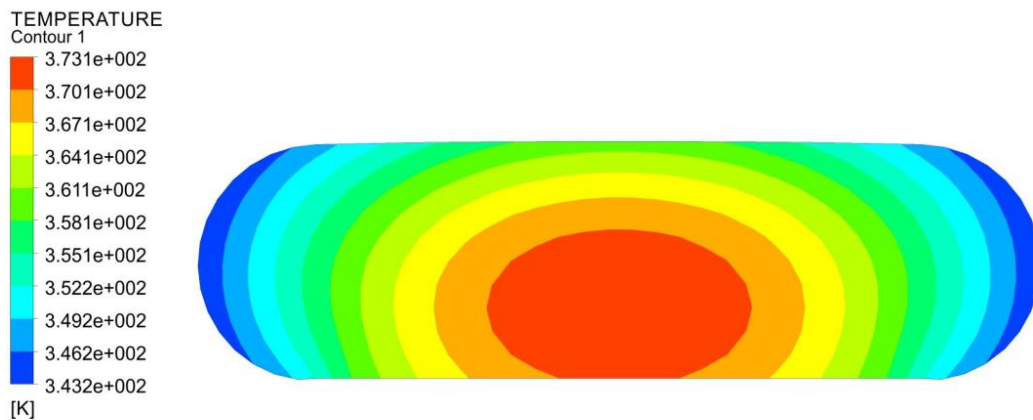
Рисунок 2.7 – Розподіл температур та форма шару без обдуву за різної початкової температури

Результати моделювання показують, що за температури, більшої за 200 °С, шар втрачає форму під дією власної ваги.

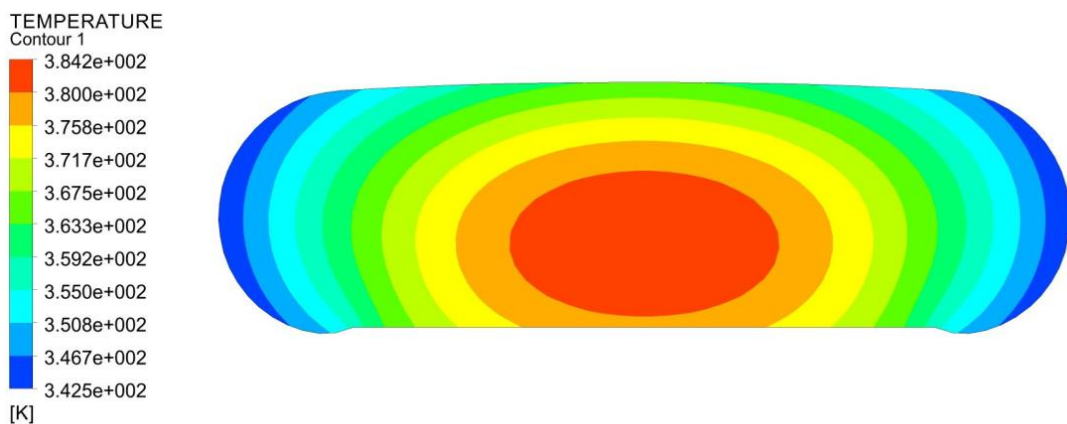
Результати аналогічних дослідів за умов часу 0,5 с з коефіцієнтом тепловіддачі $\alpha = 250 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ (інтенсивний обдув) показано на рис. 2.8.



а



б

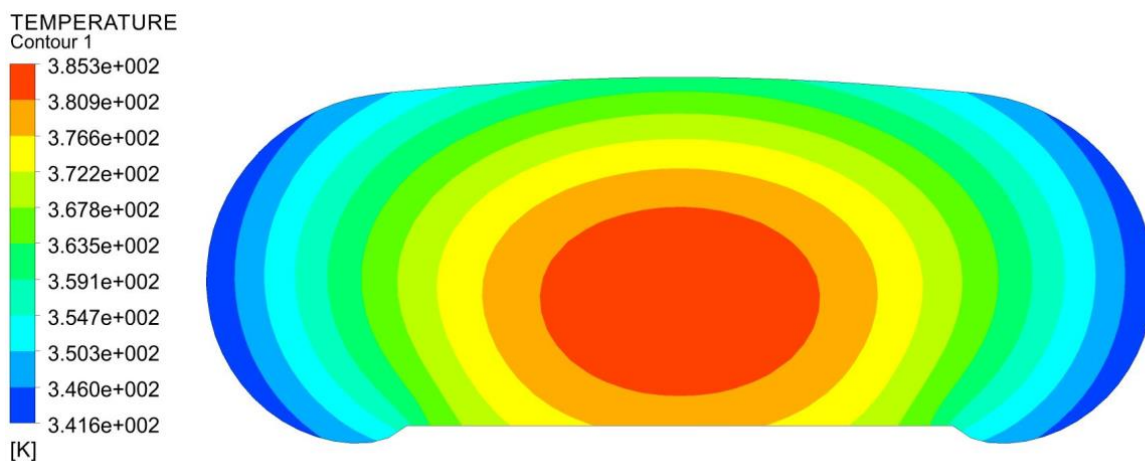


в

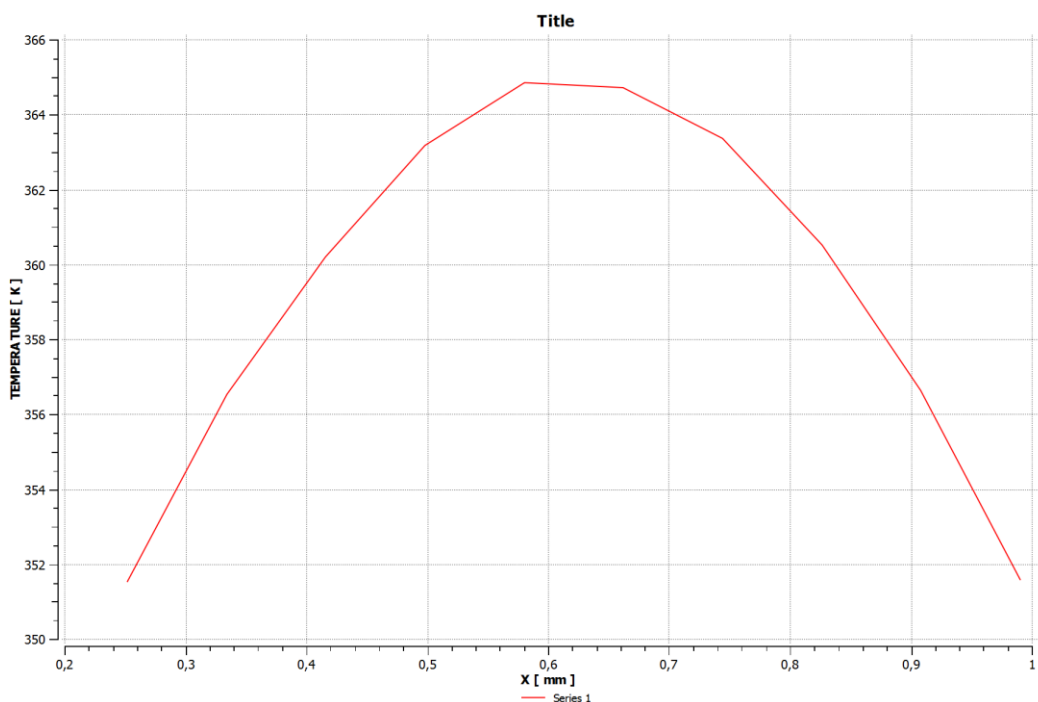
а – 200 °С; б – 210 °С; в – 220 °С

Рисунок 2.8 – Розподіл температур та форма шару з інтенсивним обдувом за різної початкової температури

Водночас, шар товщиною 0,4 мм за аналогічних умов тепловіддачі $\alpha = 250 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ деформується сильніше, а температури на поверхні зберігаються більшими (Рис. 2.9). Початкова температура складала 220°C , час охолодження 1 с.



а



б

а – в спектральному вигляді по перерізу; б – у вигляді графіка на поверхні

Рисунок 2.9 – Розподіл температур та форма шару з інтенсивним обдувом за товщини шару 0,4 мм

Із графіка на рис. 2.9,б видно, що діапазон температур на верхній поверхні шару після охолодження складає 351–365К.

Аналогічні дослідження були проведені також із шаром товщиною 0,2 мм за час 1 с з коефіцієнтом тепловіддачі $\alpha = 250 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Результат моделювання показав майже цілковиту відсутність деформації (рис. 2.11).

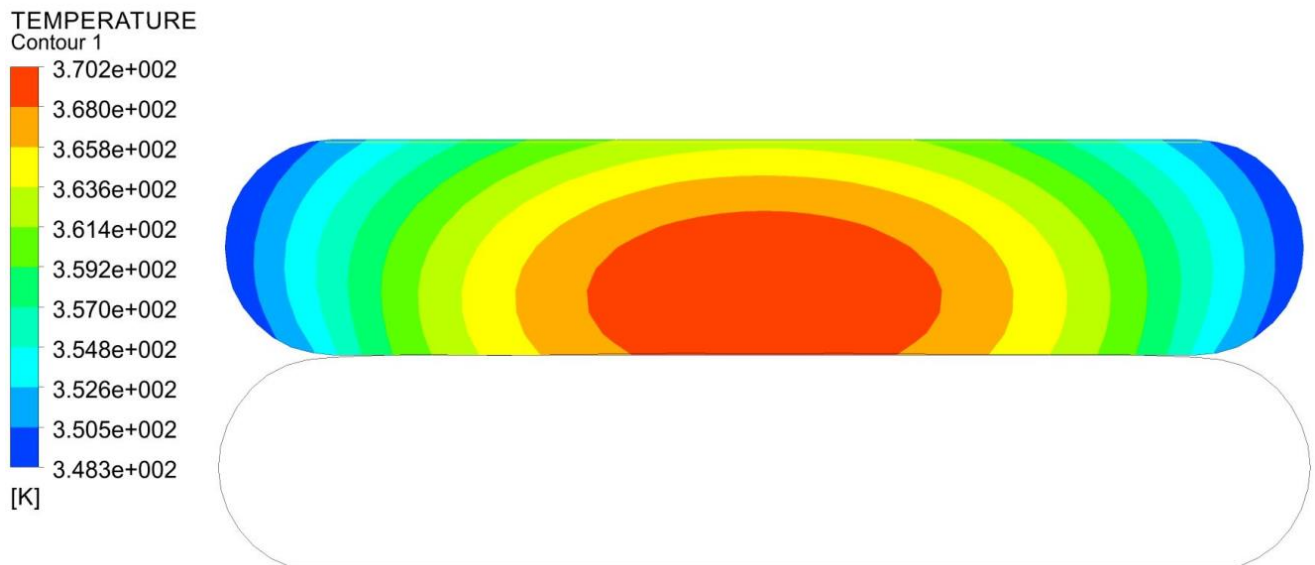
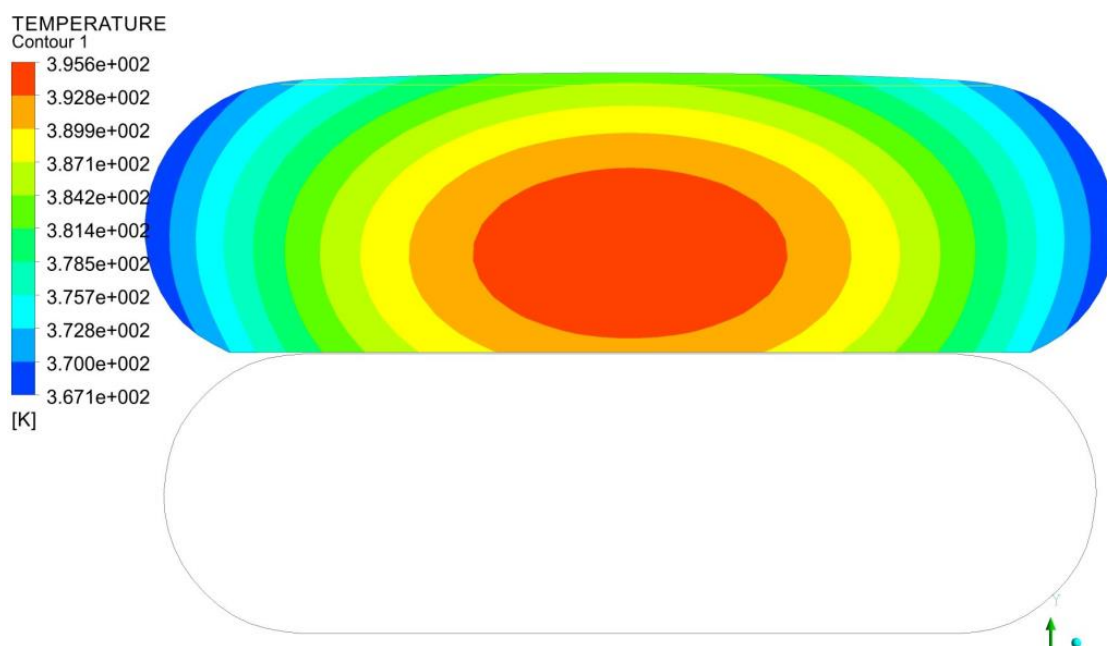
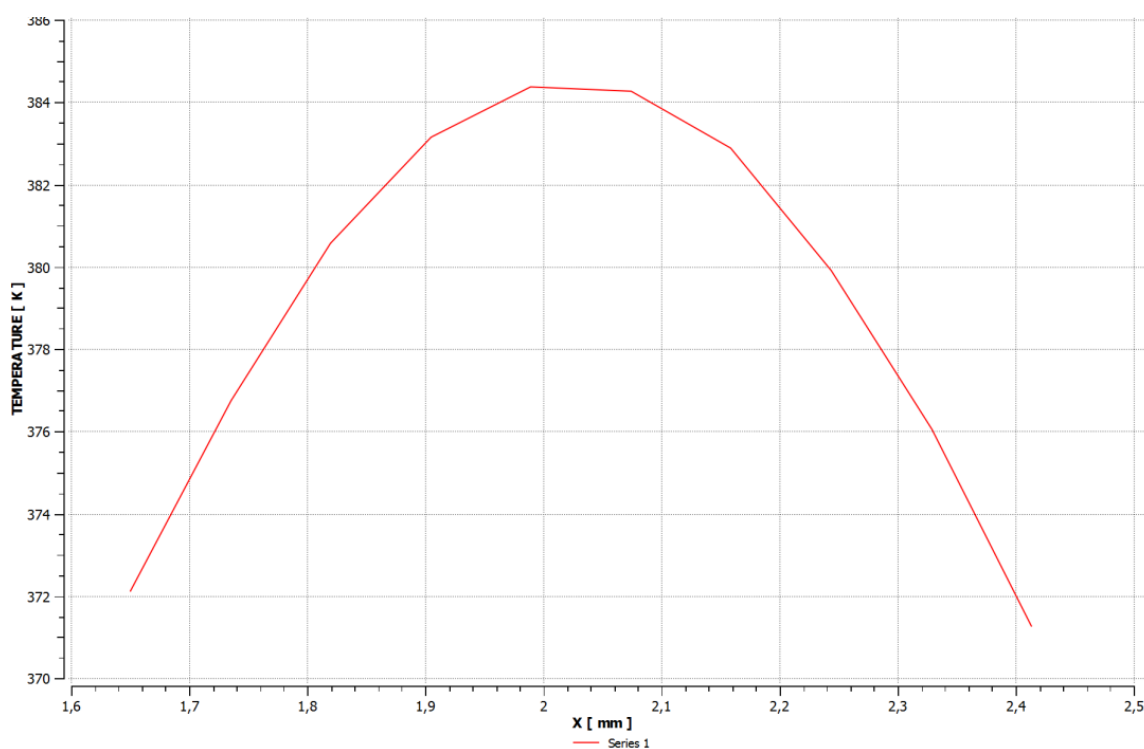


Рисунок 2.11 – Розподіл температур та форма шару з урахуванням кривизни нижнього шару товщиною 0,2 мм

Шар товщиною 0,4 мм деформується надто сильно, оскільки полімер всередині задовго зберігається з температурою текучого розплаву. Водночас шар товщиною 0,2 мм майже не деформується, проте продуктивність друку при ньому замала. Тому більш раціональною товщиною шару з огляду на співвідношення точність-продуктивність є 0,3 мм. На рис. 2.12 показано розподіл форми та температур шару час 1 с з коефіцієнтом тепловіддачі $\alpha = 250 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.



а

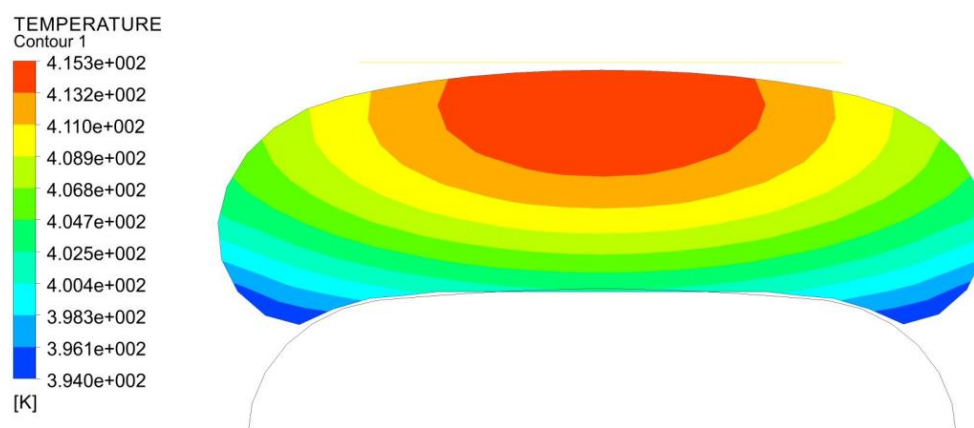


б

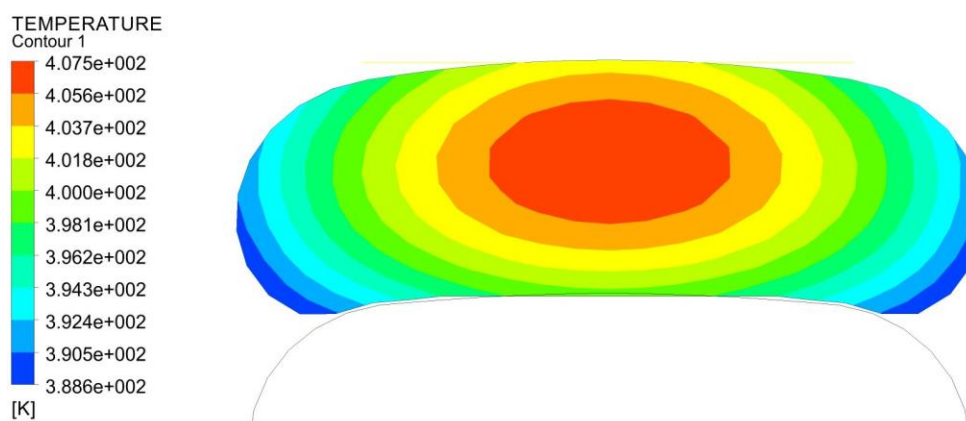
а – в спектральному вигляді по перерізу; б – у вигляді графіка на поверхні

Рисунок 2.12 – Розподіл температур та форма шару з урахуванням

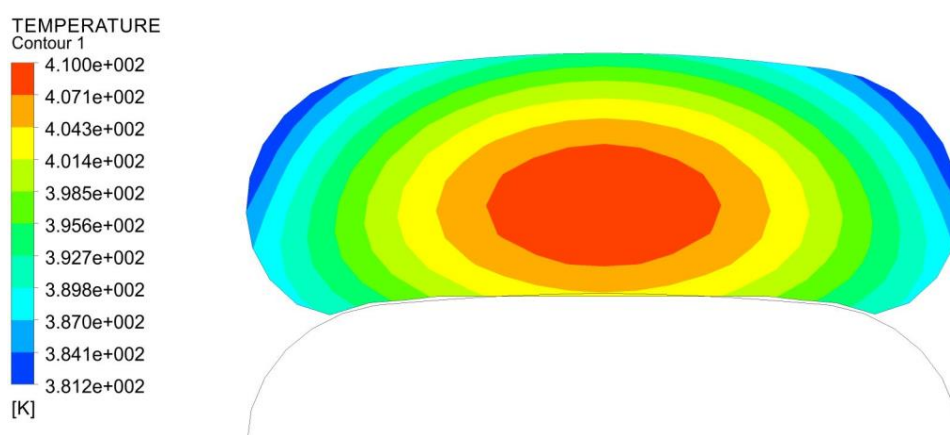
кривизни нижнього шару товщиною 0,3 мм



а



б



в

а – час 2 с, $\alpha = 20$ Вт/(м·К); б – час 1,5 с, $\alpha = 100$ Вт/(м·К);

в – час 1 с, $\alpha = 250$ Вт/(м·К)

Рисунок 2.13 – Розподіл температур та форма шару з урахуванням кривизни нижнього шару товщиною 0,4 мм

За даних умов майже максимальної інтенсивності охолодження деформація майже відсутня.

За товщини шару 0,4 мм деформація буде суттєвішою, особливо зі зменшенням інтенсивності обдуву (рис. 2.13).

Рис. 2.13 ілюструє, що за товщини шару 0,4 мм деформації шару запобігти на вдасться майже за будь-яких режимів охолодження, а це негативно впливає на точність виробу і коефіцієнт заповнення його об'єму матеріалом.

Моделювання процесів просторового друку дозволяє встановити доцільні параметри роботи 3D-принтерів та з'ясувати причини появи дефектів друківаних виробів.

2.9 Застосування ітераційно-аналітичної теорії просторових систем

У зв'язку з тим, що властивості когезійних зон між шарами, нанесеними 3D-принтером, можуть істотно відрізнятися від властивостей самого шару, в даній роботі для опису нелінійного деформування багатошарових зразків, отриманих методом 3D-друку, використовуються положення ітераційно-аналітичної теорії (ІАТ) просторових систем [54, 55], суть якої полягають в наступному.

Компоненти вектора переміщень багатошарового зразка подаються у вигляді:

$$u_i = \sum_{s=1}^S F_s^i(x^3) v_i^s(x^1, x^2), \quad (2.36)$$

де v_i^s - компоненти узагальненого вектора переміщень поверхні приведення $x^1 x^2$ конструкції; F_s^i - функції приведення ($F_1^i = 1$; $F_2^i = x^3$).

Для того, щоб вектор \vec{u} описував дійсний деформований стан оболонки, необхідно виконання варіаційного принципу Гамільтона-Остроградського, а саме:

$$\delta_{v_i^s}(W - A) + \delta_{F_i^s}(W - A) = 0. \quad (2.37)$$

Тут позначення типу δv_i^s и δF_s^i означає, що варіювання функціонала проводиться по v_i^s або F_s^i , відповідно; W – потенційна енергія деформування зразка; A – робота зовнішніх сил, прикладених до зразка.

Враховуючи (2.36) та незалежність варіацій δv_j^r та δF_r^j , отримуємо розв'язуючу систему рівнянь:

$$\begin{cases} \int_V A_j^r \left(v_i^s; \frac{\partial v_i^s}{\partial x^\alpha}; \frac{\partial^2 v_i^s}{\partial x^\alpha \partial x^\beta}; F_s^i; \frac{dF_s^i}{dx^3}; \frac{d^2 F_s^i}{(dx^3)^2}; p_j^r \right) \delta v_j^r dV = 0, \\ \int_V B_j^r \left(v_i^s; \frac{\partial v_i^s}{\partial x^\alpha}; \frac{\partial^2 v_i^s}{\partial x^\alpha \partial x^\beta}; F_s^i; \frac{dF_s^i}{dx^3}; \frac{d^2 F_s^i}{(dx^3)^2}; p_j^r \right) \delta F_r^j dV = 0 \end{cases} \quad (2.38)$$

і відповідні граничні умови:

$$\begin{cases} \int_\theta a_j^r \left(v_i^s; \frac{\partial v_i^s}{\partial x^\alpha}; F_s^i; \frac{dF_s^i}{dx^3}; q_j^r \right) \delta v_j^r d\theta = 0, \\ \int_\theta b_j^r \left(v_i^s; \frac{\partial v_i^s}{\partial x^\alpha}; F_s^i; \frac{dF_s^i}{dx^3}; q_j^r \right) \delta F_r^j d\theta = 0, \end{cases} \quad (2.39)$$

де θ – площа поверхні прикладання зовнішніх сил і переміщень.

Відмітна особливість виразу (2.38) полягає в тому, що розв'язок розв'язуючої системи рівнянь забезпечує визначення не тільки вектора узагальнених невідомих v_i^s , але також і визначення фізично обґрунтованих функцій F_s^i , незалежно від фізичних процесів, що протікають в матеріалі конструкції в будь-який момент часу, таких як пластичне деформування, розшарування або накопичення дефектів і руйнування шарів.

Розв'язок системи рівнянь (2.38) прямими методами може виявитися утрудненим. У той же час використання ітераційних методів, які полягають в послідовному уточненні компонент v_i^s , або функцій F_s^i , виходячи з умови мінімізації вектора тривимірного оператора теорії пружності, дозволяє істотно спростити отримання шуканого розв'язку. У цьому випадку друга підсистема рівнянь (2.38), як видно, представляється у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь відносно функцій F_s^i і в сенсі методу Крилова-Канторовича, тобто:

$$D_j^{r(n-1)} \left(F_s^{i(n)}; \frac{dF_s^{i(n)}}{dx^3}; \frac{d^2F_s^{i(n)}}{(dx^3)^2}; p_j^r \right) = 0, \quad (2.40)$$

з відповідними граничними умовами:

$$d_j^{r(n-1)} \left(F_s^{i(n)}; \frac{dF_s^{i(n)}}{dx^3}; p_j^r \right) = 0, \quad (2.41)$$

Коефіцієнти в рівняннях (2.40) і (2.41) представляють собою інтегральні характеристики, що залежать від компонент напружено-деформованого стану, отриманого на ітерації $n-1$, а саме:

$$D_j^{r(n-1)} = D_j^{r(n-1)} \left\{ \int_{\theta} (v_j^{r(n-1)}; p_j^{r(n-1)}) \right\} d\theta, \quad (2.42)$$

$$d_j^{r(n-1)} = d_j^{r(n-1)} \left\{ \int_{\theta} (v_j^{r(n-1)}; p_j^{r(n-1)}) \right\} d\theta.$$

Така методика розв'язку основної системи рівнянь (2.38) істотно спрощує розв'язок задачі, оскільки співвідношення (2.40) представляють собою систему звичайних диференціальних рівнянь, яка може бути легко вирішена відомими числовими методами математичної фізики, а при відповідному угрупованню невідомих допускає також отримання аналітичного розв'язку експоненціального виду, а саме:

$$\begin{cases} u_{\alpha}^m = v_{\alpha}^m + \left\{ \sum_{i=1}^4 C_i^{\alpha m} e^{r_{\alpha}^{im} x^3} + G_{\alpha}^m / \psi_{\alpha}^m \right\} \xi_{\alpha}^m \\ u_3^m = \left\{ \sum_{\alpha=1}^2 \left[\sum_{i=1}^4 \varphi_{\alpha i}^{3m} C_i^{\alpha m} e^{r_{\alpha}^{im} x^3} + C_i^{3m} e^{r_{\alpha}^{im} x^3} \right] + \gamma_3^m \right\} \omega^1 \end{cases} \quad (2.43)$$

де: v_{α}^m , ξ_{α}^m , ω^1 - компоненти вектора тангенціальних переміщень, узагальненого зсуву та прогин середнього шару, відповідно; $C_i^{\alpha m}$ – константи інтегрування, які визначаються з умов контакту між шарами і на лицьових поверхнях пакету

шарів; r_{α}^{im} - інтегральні характеристики деформування пакета, які залежать не тільки від фізико-механічних характеристик його шарів, але також і від компонент деформованого стану пакета шарів, визначеного на ітерації $n-1$; $G_{\alpha}^m / \psi_{\alpha}^m, Y_3^m$ - часткові розв'язки характеристичних рівнянь.

Особливістю отриманих рішень є те, що на їх основі можливе моделювання не тільки ефекту прослизання шарів, але також ефекту обтискання (відриву) шарів один від одного.

Моделювання процесу розшарування виконується за аналогією з [56-58]. Характерною особливістю цієї методики є фізично обґрунтована корекція тензора фізико-механічних констант зруйнованої області на основі гіпотез, прийнятих в залежності від виду руйнування (рис. 2.14).

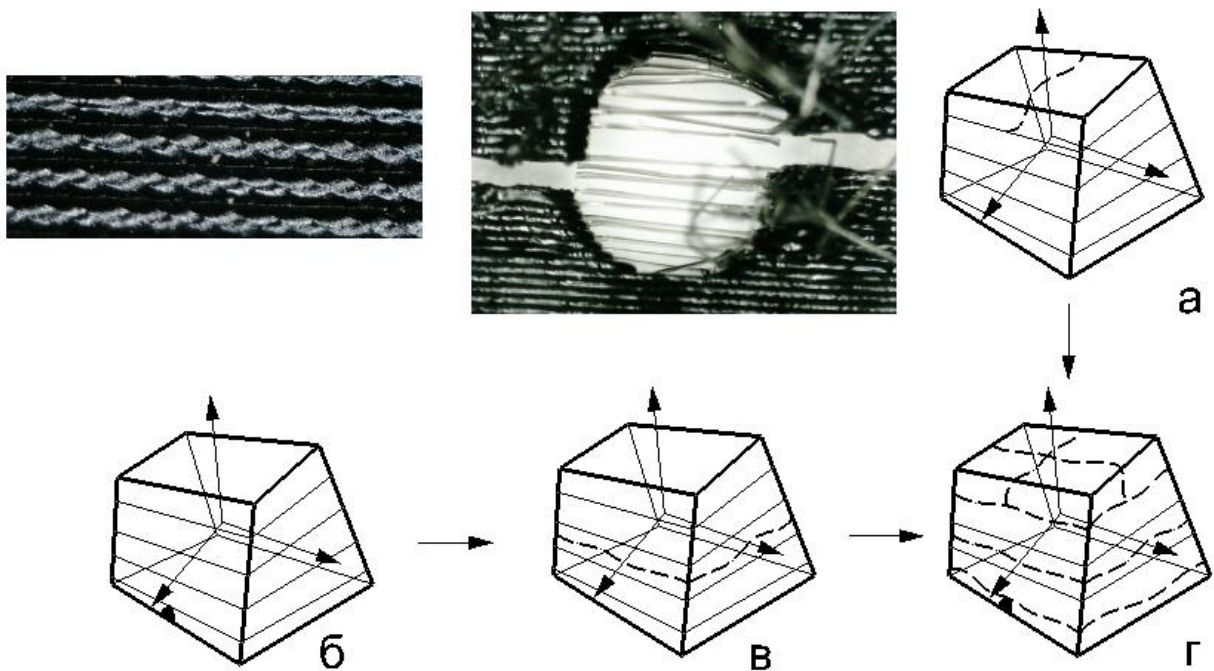


Рисунок 2.14 – Схема руйнування багатошарового СЕ: а – вихідний багатошаровий зразок; б – зруйнований зразок; в – розшарування; г – загальна картина руйнування

2.9.1 Застосування ітераційного алгоритму послідовних навантажень

Числове моделювання процесів пластичного деформування матеріалу і утворення тріщини здійснюється на базі кроків ітераційного алгоритму послідовних навантажень, заснованого на модифікованому методі Ньютона - Канторовича. Аналіз пластичного деформування шарів конструкції здійснюється на базі основних положень теорії пластичної течії з трансляційним ізотропним зміцненням [59].

Числове інтегрування рівнянь (2.38) здійснюється методом скінченних елементів (СЕ). Для цього використовується розроблений в системі APROKS багат шаровий уточнений восьмивузловий СЕ [54-56]. Практика використання цього СЕ при розв'язку великого числа тестових і прикладних задач показала його ефективність при дослідженні процесів нелінійного деформування і руйнування багат шарових просторових конструкцій [60-62].

Модель спеціального багат шарового уточненого восьмивузлового СЕ з частково зруйнованим шаром показана на рис.2.15.

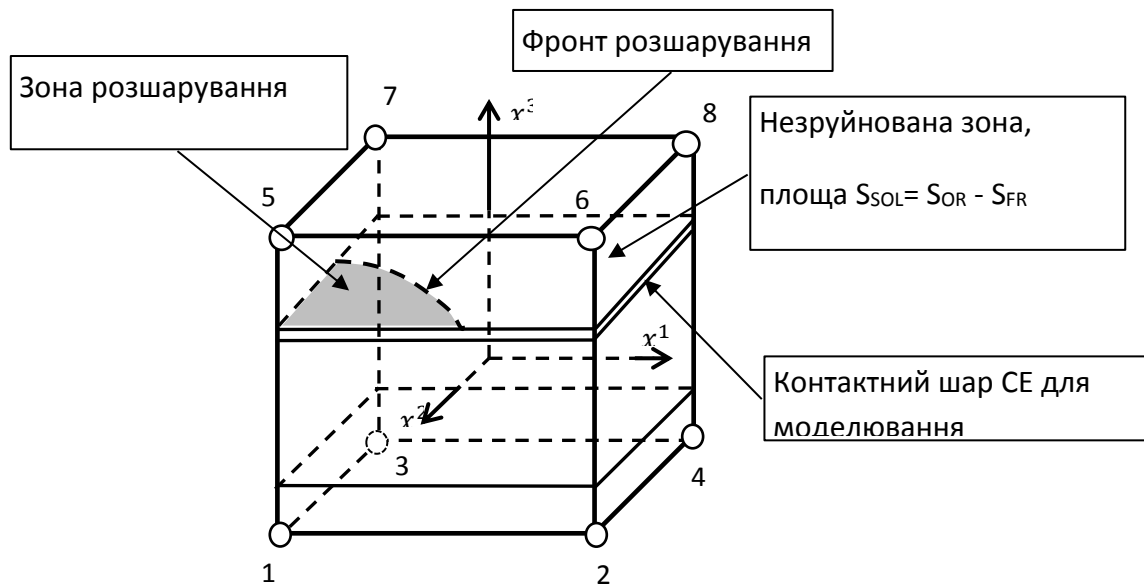


Рисунок 2.15 – Моделювання частково зруйнованого шару багат шарового СЕ

При цьому, зміна фізико-механічних характеристик m -го шару за наявності в ньому зони розшарування визначається за залежністю

$$C_m^{*ijkl} = C_m^{ijkl} \left[1 - \left(\frac{S_{FR}(m)}{S_{OR}(m)} \right)^{n(m)} \right]^{k(m)}, \quad (2.44)$$

де: C_m^{ijkl} – компоненти тензору фізико-механічних констант незруйнованого контактної m -го шару елемента; C_m^{*ijkl} – компоненти тензору фізико-механічних констант частково зруйнованого контактної m -го шару елемента; $S_{FR(m)}$ – площа зруйнованої поверхні контактної m -го шару СЕ; $S_{OR(m)}$ – площа поверхні початкового контактної m -го шару СЕ; $n(m)$ и $k(m)$ – константи матеріалу m -го шару, що визначаються з натурних або числових експериментів.

Таким чином, просування фронту в контактному шарі СЕ здійснюється за рахунок врахування зміни жорсткості цього шару, що обумовлена частковим або повним його розшаруванням.

При дослідженні геометрично нелінійного деформування конструкцій методом скінченних елементів особливо актуальними є питання, пов'язані з призначенням апроксимуючих функцій, що задовольняють умовам спільності деформацій при зміщеннях тіла як жорсткого цілого. З цієї причини, в даній роботі для дослідження процесів розповсюдження тріщин в фізично і геометрично нелінійній постановці використовувалась МССЕ, запропонована проф. Сахаровим О. С.

Відповідно зі співвідношеннями ІАТ нелінійні закони апроксимації переміщень по товщині показано на рис. 2.16.

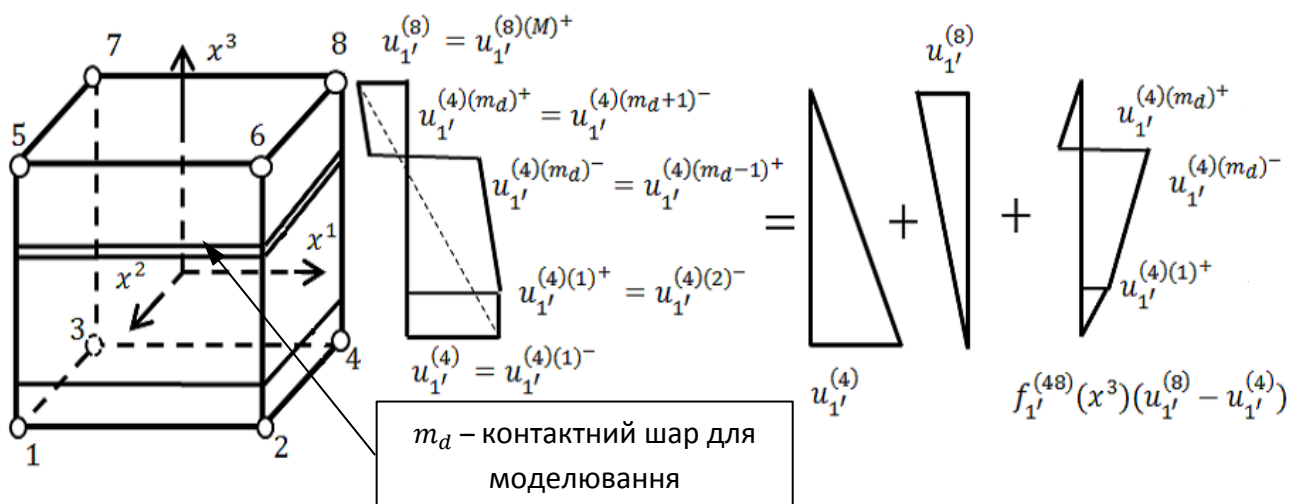


Рисунок 2.16 – Апроксимація компонент вектора переміщень багатошарового уточненого восьмивузлового СЕ в випадку розшарування з урахуванням тертя

$(\mathbf{u}_{i'}^{(t)})$ - компоненти модуля вектору переміщень вузла t в напрямку i' ;
 $\mathbf{f}_{i'}^{(point(-),point(+))}$ – скалярні функції приведення, що характеризують ступінь неоднорідності розподілу деформацій поперечного зсуву по товщині пакету шарів грані $(point(-),point(+))$ СЕ в напрямку i' ; $\mathbf{u}_{i'}^{(point)(m)\pm}$ - компоненти модуля вектора переміщень в напрямку i' , що визначені на верхній (+) та нижній (-) поверхнях шару m , вузла $(point)$; $\mathbf{a}_{i'}^{(s)}$ – коефіцієнти штрафу, що дорівнюють 0 для граней, які є спільними з гранями сусідніх стандартних восьмикутових СЕ (для забезпечення умов сумісності по переміщенням) і дорівнюють 1 у всіх інших випадках)

Скінченний елемент забезпечує повну сумісність зі стандартним восьмивузловим СЕ та має наступні суттєві переваги:

1. Можливість дослідження факторів неоднорідності деформацій поперечного зсуву, що залежать не тільки від співвідношень жорсткісних характеристик, але й від компонент НДС пакету;
2. Можливість природним чином фізично обґрунтовано змінювати кінематичні і статичні умови контакту між шарами в процесі покрокового навантаження конструкції, що дозволить моделювати процеси накопичення дефектів, розвитку зон пластичності в шарах та зон розшарування;
3. Стійкі показники збіжності рішень по визначенню компонент НДС як масивних тривимірних тіл, так і тонких конструкцій;
4. При зміні фізико-механічних характеристик шарів багатошарового СЕ на 8 та більше порядків зберігаються стійкі показники збіжності;
5. Порядок розрішуючої системи рівнянь не залежить від кількості шарів в пакеті;
6. Побудова матриці жорсткості уточненого восьмивузлового СЕ виконується відповідно до загальної процедури МССЕ.

Перевизначення апроксимуючих функцій вектора переміщень по товщині пакету шарів СЕ з урахуванням утворених зон розшарування здійснюється на основі ітераційно-аналітичного методу перемінних апроксимацій [54,55].

Для моделювання фізично нелінійної поведінки матеріалу застосовується теорія пластичної течії. Це дозволяє враховувати складність траєкторії навантаження, змінність параметрів пластичності, ефект Баушингера. Оскільки асимптотичні методи визначення коефіцієнту інтенсивності навантажень (КІН) не можуть бути застосовані в разі розв'язку нелінійної задачі механіки руйнування, в роботі застосовується енергетичний метод податливості для визначення вивільнення енергії G при просуванні тріщини на одиницю площі.

2.9.2 Сутність методу податливості

Енергетичний критерій руйнування Гріфітса [63] полягає в тому, що зростання тріщини може мати місце в тому випадку, якщо система може виділити енергію, необхідну для утворення додаткової тріщини з розміром d_a . У випадку пластини з нерухомими краями зовнішнє навантаження не може здійснити ніякої роботи. Тому енергія, необхідна для росту тріщини, повинна бути передана за рахунок звільнення пружної енергії. Якщо краї пластини під час розширення тріщини можуть вільно переміщатися, то зовнішнє навантаження здійснює роботу. В цьому випадку пружна енергія, накопичена в пластині, що не зменшується, а збільшується.

Для пластини одиничної товщини умову зростання тріщини можна записати у вигляді:

$$\frac{d}{da}(F - U) = \frac{dW}{da}, \quad (2.45)$$

де U – пружна енергія, що міститься в пластині; P – робота, що здійснюються зовнішньою силою; W – енергія, необхідна для утворення тріщини. $G = d(F - U)/da$ – «інтенсивність виділення енергії», або «сила розкриття тріщини», а $R = dW/da$ – опір росту тріщини.

Розглянемо пластину товщини B , на яку діє навантаження P як показано на рис. 2.17. Під дією навантаження точки прикладання сили переміщуються відносно один одного на певну відстань. При збільшенні розміру тріщини на da ,

відносне переміщення збільшується на dv . Отже, здійснена зовнішніми силами робота буде дорівнювати Pdv . Звідси слідує, що:

$$G = \frac{d}{da}(F - U) = \frac{1}{B} \left(P \frac{dv}{da} - \frac{dU_1}{da} \right), \quad (2.46)$$

де B – товщина пластини (рівняння 2.45 записано для пластини одиничної товщини), U_1 – повна пружна енергія, запасені в пластині товщини B . Деформації вважаються пружними. За відсутності зростання тріщини переміщення v пропорційне навантаженню: $v = CP$, де C – податливість пластини (величина, зворотна її жорсткості). Для пластини без тріщини, що має довжину L , ширину W і товщину B , податливість $C = L/(BWE)$, де E – модуль Юнга. Пружна енергія пластини (з тріщиною):

$$U_1 = \frac{Pv}{2} = \frac{CP^2}{2}. \quad (2.47)$$

Використовуючи рівняння (2.47), можна обчислити величину, яка визначається виразом (2.46), звідки отримаємо:

$$G = \frac{1}{B} \left(P^2 \frac{dC}{da} + CP \frac{dP}{da} - \frac{1}{2} P^2 \frac{dC}{da} - CP \frac{dP}{da} \right) = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da}. \quad (2.48)$$

Члени з dP/da скорочуються. Це означає, що величина G не залежить від того, є навантаження постійним чи ні:

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} = \frac{1}{B} \left(\frac{dU_1}{da} \right)_P = - \frac{1}{B} \left(\frac{dU_1}{da} \right)_v. \quad (2.49)$$

Величина G завжди дорівнює похідній від пружної енергії (проте знак цієї величини при різних умовах навантаження різний: при постійному навантаженні U збільшується, а при нерухомих затискачах U зменшується).

Рівняння (2.49) являє собою співвідношення між швидкістю виділення енергії і податливістю. Таким чином, зі співвідношення між G і K слідує, що для плоского напруженого стану:

$$K^2 = EG = \frac{EP^2}{2B} \frac{\partial C}{\partial a}. \quad (2.50)$$

У випадку плоскої деформації у співвідношення слід додати $(1-\nu^2)$.

Рівняння (2.50) дозволяє визначати K і G з податливості зразка або за допомогою обчислень, або експериментально. Слід зазначити, що податливість визначається за формулою:

$$C = \frac{\nu}{P}, \quad (2.51)$$

тобто вона визначається відносним переміщенням точок прикладання навантаження. Рівняння (2.50) часто використовують для обчислень K методом скінченних елементів.

Прикладом застосування цього принципу є обчислення K і G для зразка, що має форму двоконсольної балки (ДКБ) і зображеного на рис. 2.17.

Якщо розмір тріщини вимірюється від точки прикладання навантаження, то з теорії простого згину слідує, що відносне переміщення двох точок прикладання навантаження:

$$\nu = \frac{2Pa^3}{(3EI)} = \frac{8Pa^3}{(Eh^3B)}, \quad (2.52)$$

Отже, податливість зразка:

$$C = \frac{\nu}{P} = \frac{8a^3}{(Eh^3B)}, \quad (2.53)$$

Звідси слідує, що інтенсивність виділення енергії:

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{\partial C}{\partial a} = \frac{12P^2 a^2}{Eh^3 B^2}, \quad (2.54)$$

а коефіцієнт інтенсивності напружень:

$$K = 2\sqrt{3} \frac{P}{h^{3/2}} \frac{a}{b}, \quad (2.55)$$

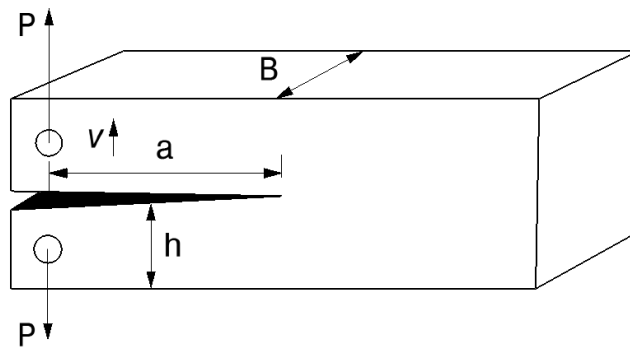


Рисунок 2.17 – Схема навантаження двоконсольної балки

Для цього в роботі використано кроково-ітераційний алгоритм послідовних навантажень, заснований на модифікованому методі Ньютона-Канторовича [64]. Переформування матриці жорсткості виконується на початку чергового кроку по навантаженню і після кожного етапу просування тріщини. Урахування пластичної роботи матеріалу здійснюється в процесі ітерацій по методу додаткових навантажень. Суттєвою відмінністю цього алгоритму є те, що в блоці формування матриці жорсткості реалізовано методи змінних жорсткостей і змінних апроксимацій.

Можливість моделювання процесу розшарування багат шарових конструкцій на базі багат шарового восьми вузлового уточненого СЕ розглянута на прикладі модельної задачі про дослідження деформування тришарової вільно опертої балки з тонким середнім шаром (рис. 2.18). Модуль пружності середнього шару варіювалася в діапазоні від $E_2 = 1 \times 10^6$ МПа до $E_2 = 1 \times 10^{-4}$ МПа. Паралельно виконувалися розрахунки балки з використанням стандартного багат шарового (C3D8I) і багат шарового оболонкового (S4R) елементів (гіпотеза Тимошенко) з бібліотеки СЕ системи ABAQUS.

Результати досліджень, наведених на рис. 2.18, відображають залежність зміни прогину центральної точки балки від значення ступеня n модуля пружності середнього шару $E_2 = 1 \times 10^n$. В результаті численних експериментів встановлено, що при зміні жорсткості середнього шару на шість порядків і більш зовнішні шари починають ковзати незалежно один від одного, а прогин в середині прольоту балки зростає в чотири рази.

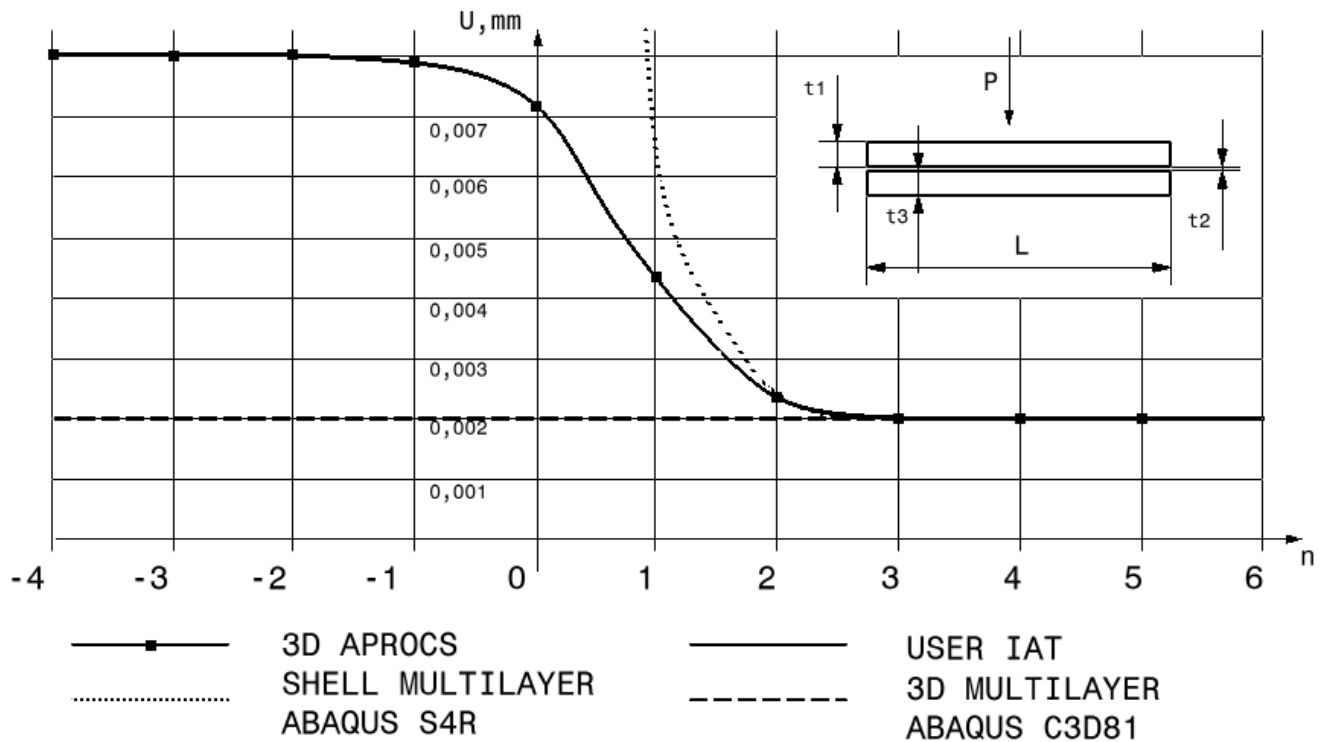


Рисунок 2.18 – Прогин центральної точки балки в залежності від показника степені $n = \log_{10}(E_2)$ модуля пружності середнього шару $E_2 = 1 \times 10^n$ МПа; L (довжина зразка) = 20мм; B (ширина зразка) = 1мм; t_1 (товщина) = $t_3 = 0,499$ мм; $t_2 = 0,002$ мм; $E_1 = 1 \times 10^5$ МПа; $\nu = 0$; $P = 10$ Н

Отримані результати повністю узгоджуються з відомим з опору матеріалів вирішенням цього завдання для прогину ресор, що свідчить про те, що на базі використовуюваного СЕ можливо коректне моделювання процесу розшарування.

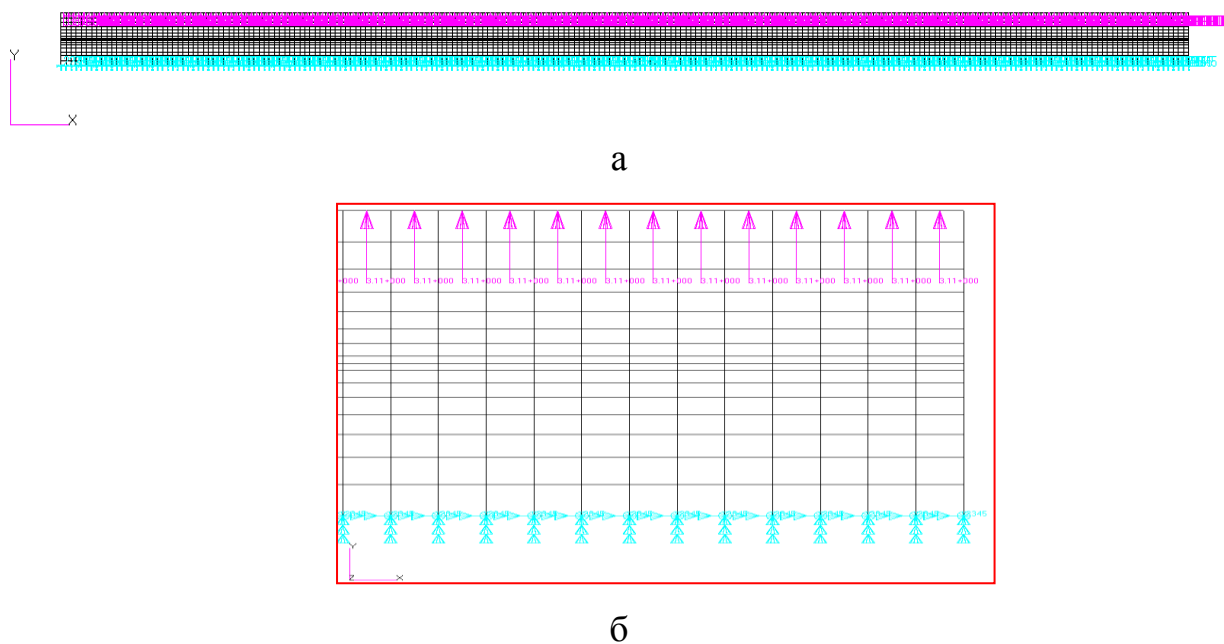
2.10 Результати моделювання розшарування друкованого термопластичного полімерного зразка

З метою верифікації запропонованої методики моделювання розшарування з урахуванням міжшарової взаємодії було виконано моделювання згідно наведеної моделі у середовищі NASTRAN.

Була змодельована ділянка зразка, що відповідає двом суміжним шарам: ширина зразка $t = 10$ мм, товщина шару $\Delta_{шару} = 0,2$ мм, діаметр сопла $d_{сопла} = 0,5$ мм. Середина сітки, що відповідає зоні дотику двох шарів, згущена. Властивості

матеріалу: межа міцності при навантаженні на розтяг $[\sigma] = 52,8$ МПа, модуль Юнга $E=3,3$ ГПа, коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,28$.

На рис. 2.19 показано розрахункову схему зразка.



а – геометрія зразка та сіткова область; б – фрагмент зразка з закріпленням і навантаженням

Рисунок 2.19 – Розрахункова схема зразка

Переміщення ділянок зразка показано на рис. 2.20.

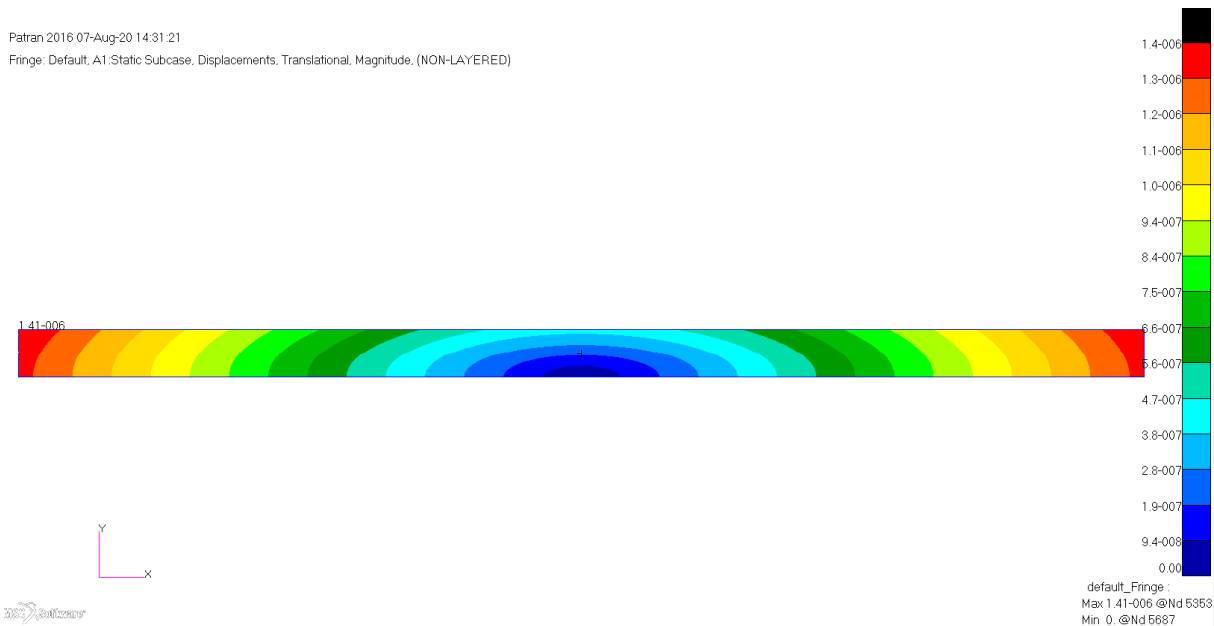
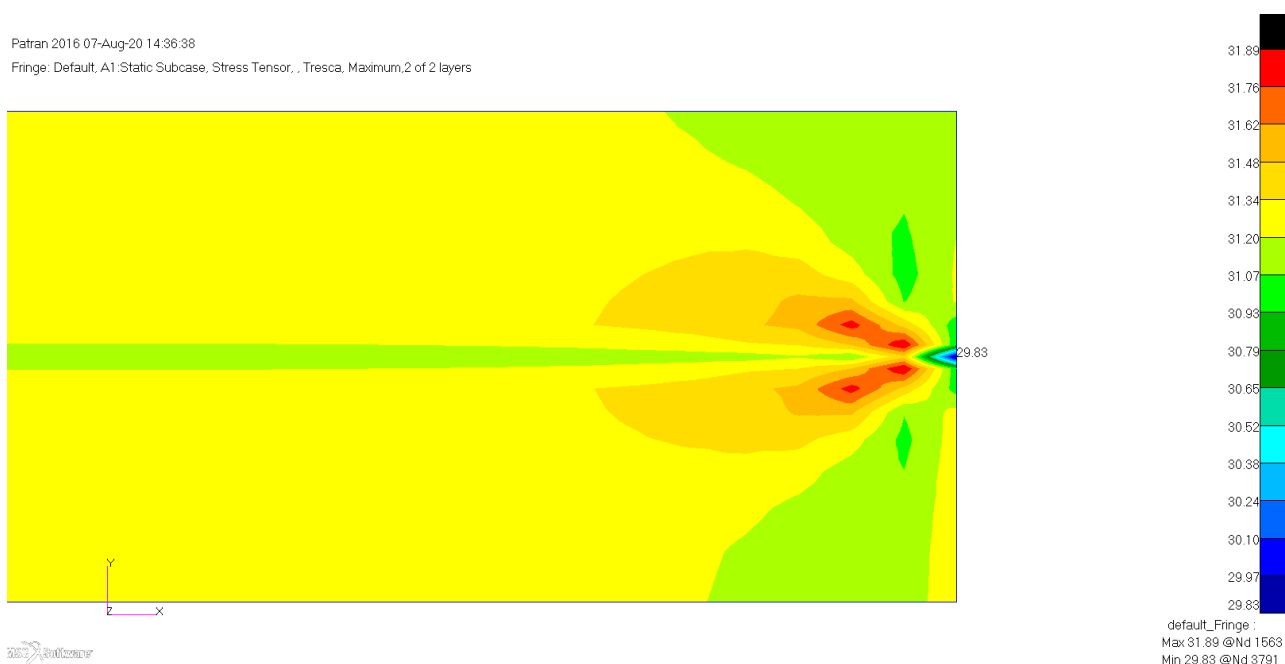


Рисунок 2.20 – Розподіл переміщень ділянок зразка

Розподіл еквівалентних напружень (рис. 2.21) показує, що розшарування відбувається починаючи з країв поверхні контакту шарів.



а



б

а – загальний вигляд; б – збільшено біля місця концентрації напружень

Рисунок 2.21 – Розподіл еквівалентних напружень

Аналогічне моделювання було здійснено в середовищі ANSYS. Модулі пружності і коефіцієнти Пуассона основних шарів та області контакту задано на

основі експериментально визначених значень (п. 3.4.10). Отримані значення напружень, що виникають в контактному шарі при розтягу та зсуві (показано мітками), відповідають експериментальним даним. За результатами експериментів руйнівне напруження на розтяг основного шару складо 35,67 МПа за величини деформації 1,42%. За умов зсуву руйнівне напруження контактної шару складо 17,92 МПа за величини деформації 1,78%. Похибка моделювання складає не більш ніж 5-7%.

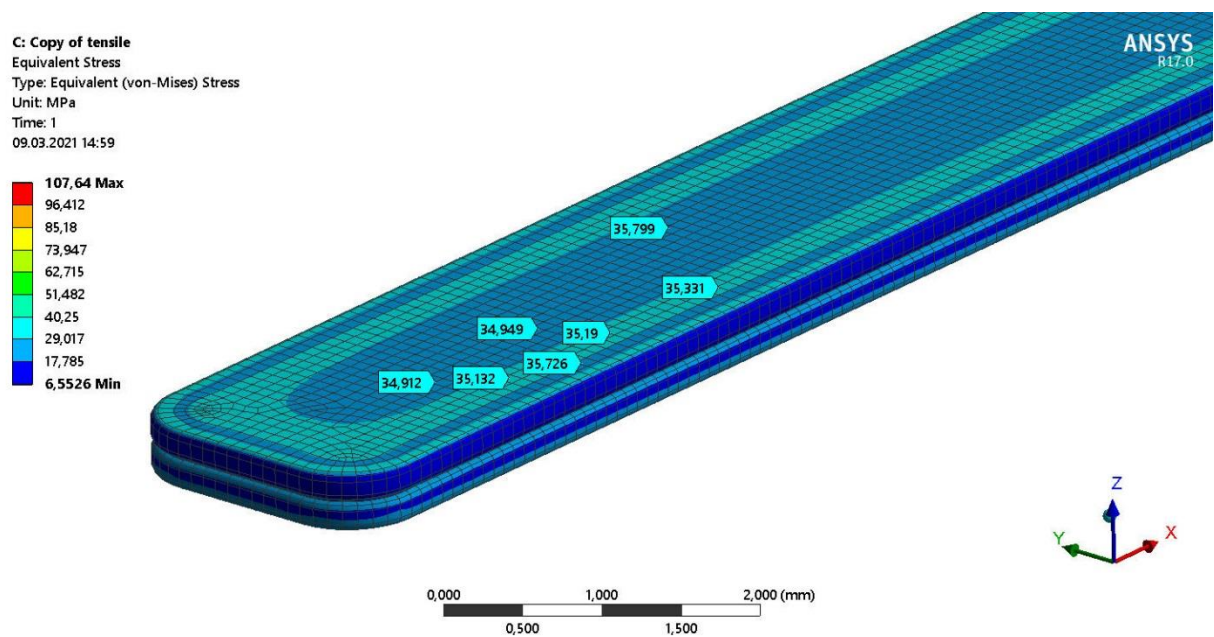


Рисунок 2.22 – Розподіл напружень в зоні контакту шарів під час одноосьового розтягу

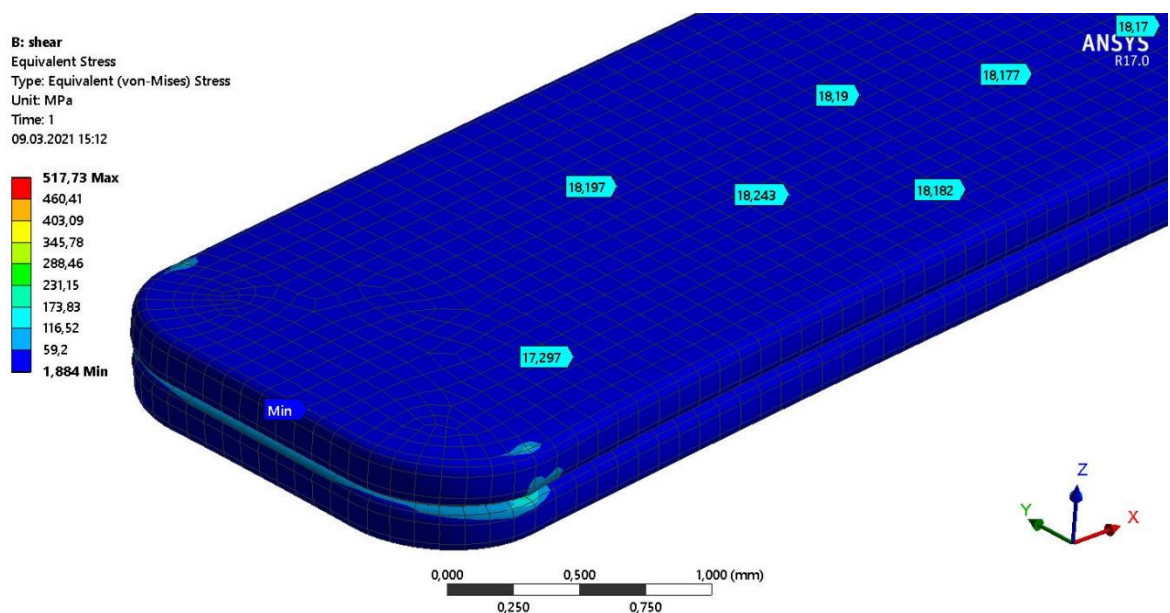


Рисунок 2.23 – Розподіл напружень в зоні контакту шарів під час зсуву

Запропоновані модель та методика числового моделювання дають змогу прогнозувати міцність друкованих полімерних виробів в напрямі поперек шарів на основі експериментальних даних випробувань друкованих зразків на розтяг.

2.11 Висновки

Моделювання процесу охолодження шару нанесеного полімерного матеріалу дало змогу встановити зміну форми поперечного перерізу у часі. Були досліджені основні товщини шарів, що використовуються в процесі 3D друку. В результаті обчислень встановлено режими охолодження при яких деформації є практично відсутні або мінімальними, а також встановлені критичні режими при яких неможливо уникнути великих деформацій поперечного перерізу. Моделювання дає змогу отримати дані про ступінь заповнення поперечного перерізу виробів, встановити причини появи дефектів та підібрати оптимальні товщини та швидкості друку.

Моделювання процесу випробування на розтяг показали нерівномірність властивостей друкованого зразка в напрямі поперек шарів та показало зародження розшарування поперек шарів.

Наведені модель та методика числового моделювання дають змогу прогнозувати міцність друкованих полімерних виробів в напрямі поперек шарів з урахуванням експериментальних даних випробувань друкованих зразків на розтяг.

Розрахунки відповідають ідеально точній геометрії, зона контакту є постійною по перерізу та довжині зразка. Проте така картина некоректна на практиці. Тому необхідні експериментальні дослідження, що відповідають умовам математичного моделювання.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Опис обладнання для експериментальних досліджень

3.1.1 Опис FDM 3D-принтерів

Виходячи з аналізу сучасних конструкцій FDM 3D принтерів, для друку зразків було обрано два типи конструкцій механік: Prusa та H-bot (рис. 3.1). Основні технічні характеристики пристроїв наведені в Таблиці 2.1. Для точності досліджень на всіх пристроях було встановлено однакові сопла, термодатчики та тип програмного забезпечення.

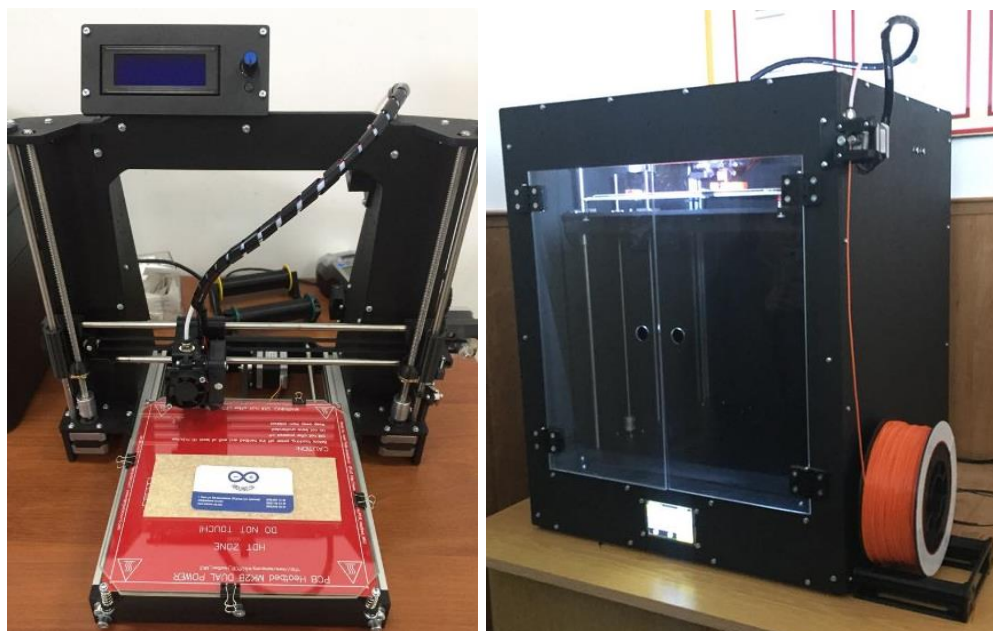


Рисунок 3.1 – FDM 3D-принтер типу Prusa I3, CoreXY та H-bot

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики FDM 3D-принтерів типу Prusa I3, CoreXY та H-bot

	Prusa I3	H-Bot		Prusa I3	H-Bot
Тип	FDM	FDM	$T_{\text{екс. макс.}}, ^\circ\text{C}$	250	280
Сопло	1	1	$T_{\text{плат. макс.}}, ^\circ\text{C}$	120	120
Діаметр сопла, мм	0,5	0,5	Точність по XY, мм	0,012	0,004

Продовження Таблиці 3.1

Робоча зона, мм	200x200 x200	310x310 x340	Точність по Z, мм	0,004	0,002
Точність друку, мм	±0,1 – 0,2	±0,05 – 0,1	D філам, мм	1,75 мм	1,75
Товщина шару, мм	0,1 – 0,4	0,05 – 0,6	Тип філаменту	PLA, HIPS, coPET	ABS, PLA, HIPS, coPET, NYLON
Швидкість друку, мм/с	20-120	20-150	Плата	8bit	32bit

3.1.2 Опис 3D сканерів

Для дослідження геометрії друкованих виробів використано 3D сканери двох моделей: Sense та ARTEC EVA (рис. 3.2). Основні технічні характеристики пристроїв наведено в Таблиці 3.2.



Рисунок 3.2 – 3D сканери типу Sense та ARTEC EVA

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики 3D сканерів

	Sence	ARTEC EVA
Точність точки, мм	0,5	0,1
Швидкість, точ/с	0,4 млн.	2 млн.
Точність, мм	1	0,5
Зона захвату, см ³	45000	61000
Розміри, мм	178x129x35	262 × 158 × 63

3.1.3 Установа для випробування зразків на розтяг

Для вивчення механічних властивостей друкованих виробів було створено експериментальну установку (рис. 3.3). Установка дозволяє вимірювати зусилля розтягу та видовження зразків. Була розроблена електронна цифрова схема (рис. 3.4) та створено програмне забезпечення для керування установкою та обробки даних (рис. 3.6).

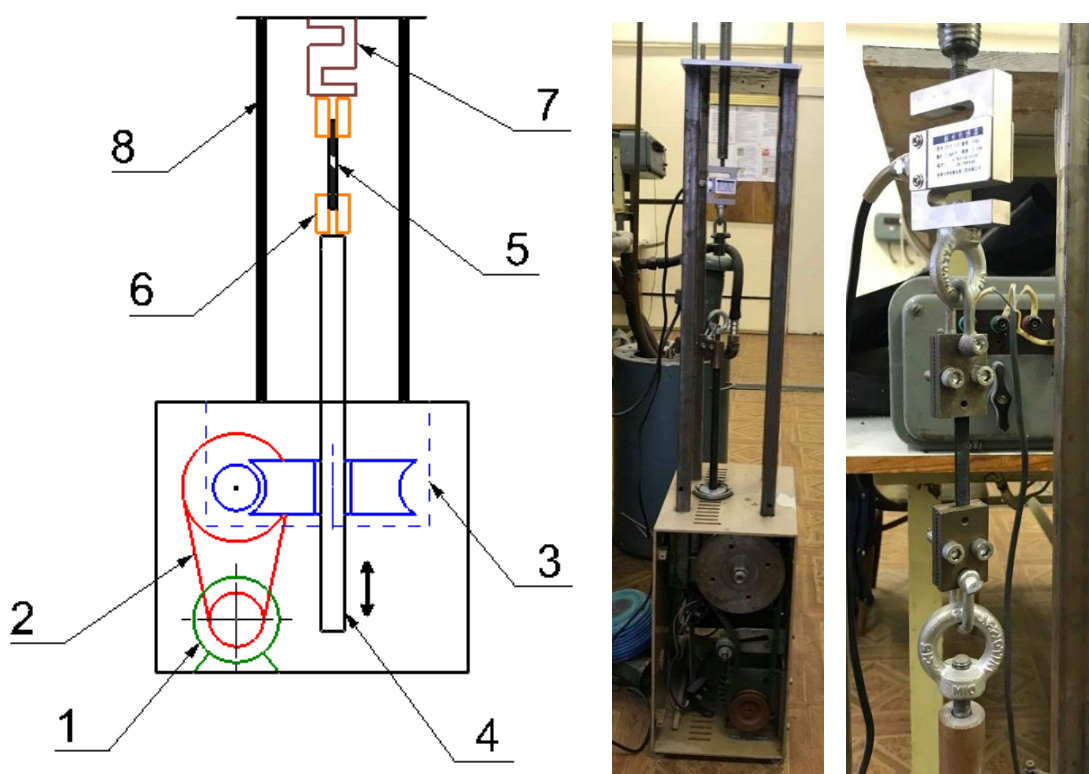


Рисунок 3.3 – Експериментальна установка для випробувань на розтяг

Програмне забезпечення було написано на мові програмування С# дозволяє керувати переміщенням виконавчих органів, а саме положенням затискних лещат та нульовим положенням зразка, отримувати данні з датчиків в режимі реального часу, будувати графік залежності видовження дослідного зразка від зусилля розтягу (рис. 3.6). Експериментальна установка для випробувань на розтяг отримує дані за допомогою високоточного тензодатчика S-типу YZC-516С та енкодера КУ-040 (рис. 3.5).

Тензодатчик YZC-516С використовувався для виміру зусилля розтягу. Максимально допустиме зусилля – 50 кг. Енкодер КУ-040 використовувався для виміру переміщення. Для цього вимірювалось лінійне переміщення робочого органу установки за один оберт енкодера. Отримане значення вносилось в меню “Калібрування” програмного забезпечення установки.

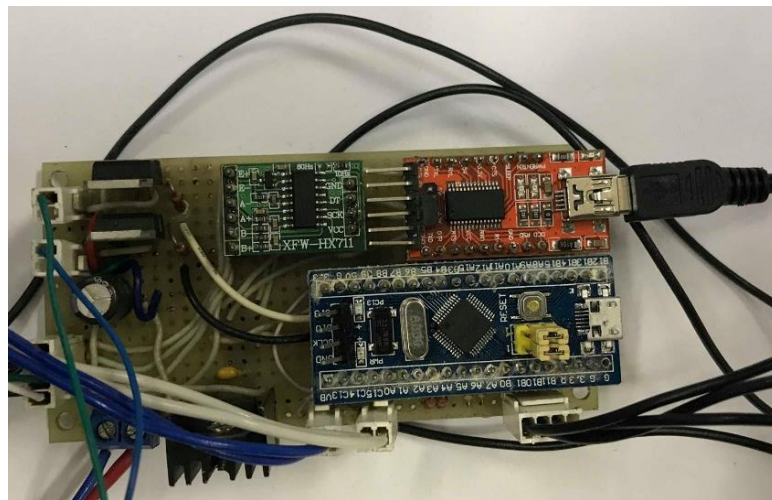


Рисунок 3.4 – Електронна схема експериментальної установки

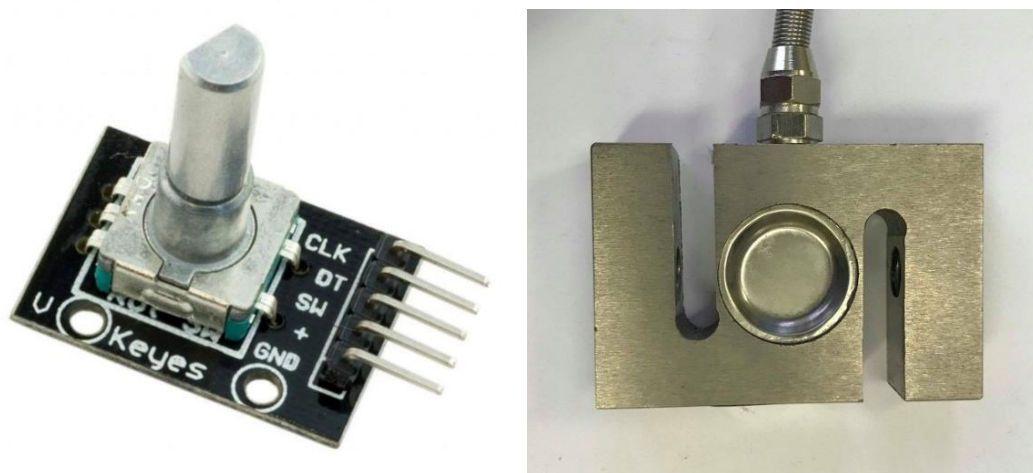


Рисунок 3.5 – Енкодер КУ-040 та тензодатчик S-типу YZC-516С

Також до електронної частини установки входять два кінцевика, які обмежують переміщення виконавчих органів. Тому максимально допустиме переміщення складає 15 см. Механічна частина установки включає в себе несучу раму 1, черв'ячний редуктор 3, електродвигун 2, гвинтову пару 4, систему фіксації дослідних зразків 6.

Установка працює наступним чином. Електродвигун 1 через ремінну передачу 2 обертає черв'ячний редуктор 3. В зубчатому колесі редуктора вставлена гайка через яку проходить різьбовий вал 4. Завдяки цьому відбувається лінійне переміщення валу 4. До неї прикріплені фіксуючі губки 6, в які закріплюється дослідний зразок 5. Через верхні губки 6 кріпляться до станини 8 через тензодатчик 7.

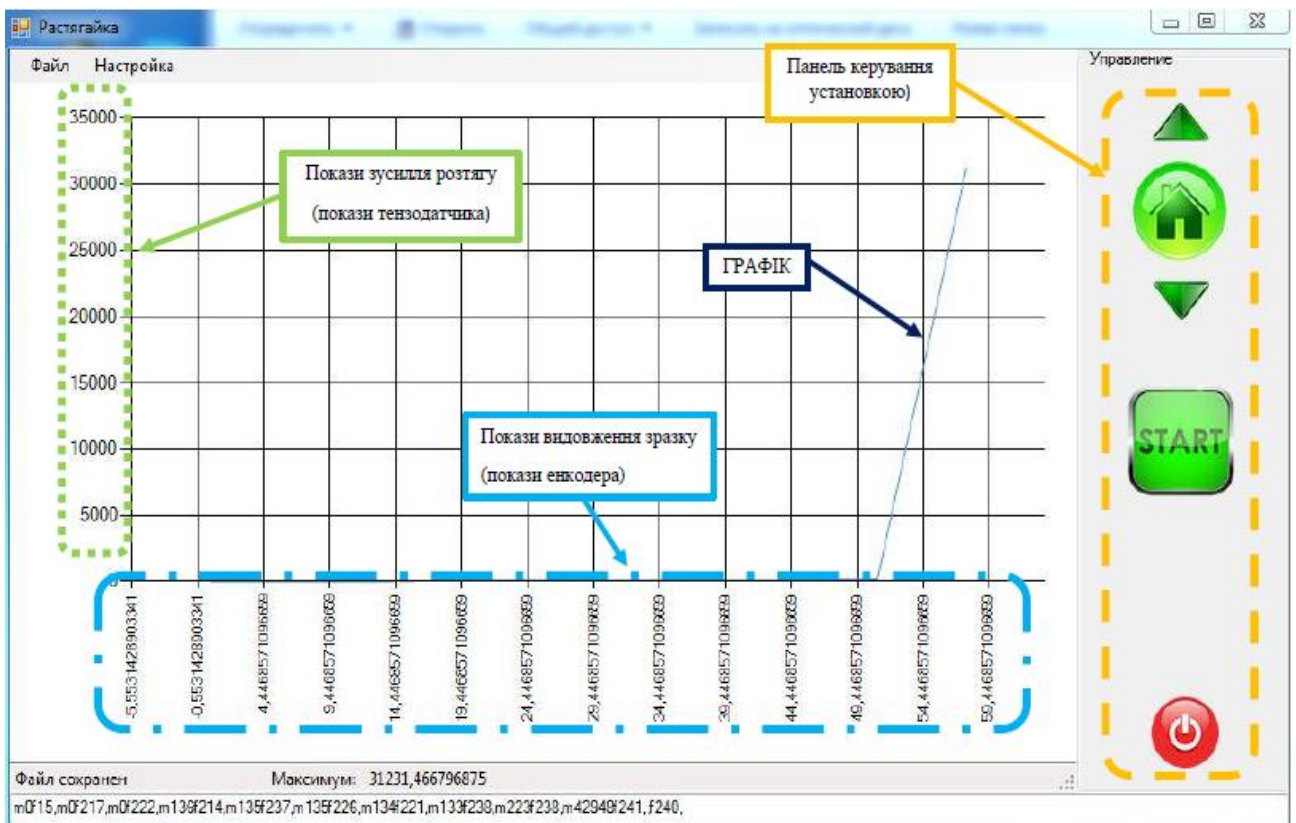


Рисунок 3.6 – Інтерфейс програмного забезпечення програми керування та вимірювання даних установки для випробовування зразків на розтяг

3.2 Методика дослідження

Найбільш поширений вид випробувань для оцінки механічних властивостей матеріалів - випробування на одноосьовий розтяг. Одновісне розтягнення є найбільш простим з точки зору експериментального здійснення, порівняно легко піддається аналізу, дозволяє за результатами одного досвіду визначити характеристики таких найважливіших механічних властивостей матеріалів, як пружність, міцність, статична в'язкість.

Методи випробування на статичний розтяг стандартизовані. Є окремі стандарти на випробування за кімнатної, зменшеної та збільшеної температурах. У стандартах дано типові форми і розміри зразків, описані методи визначення характеристик, які оцінюються в ході експерименту, основні вимоги до дослідного устаткування, методики проведення експерименту і обробки кінцевих результатів. Основним документом, що регламентує дослідження полімерних зразків на розтяг є ГОСТ 11262-80 [79] (аналог ASTM Standard D628-14 [80])

На даний момент не існує чіткої методики для випробувань друкованих зразків, особливо на розтяг між шарами. Тому було розроблено додаткові рекомендації, щодо виготовлення та дослідження на розтяг друкованих зразків та використано в наступній методиці.

3.2.1 Виготовлення зразків

Для друку зразків (рис. 3.7) необхідно дотримуватись наступних рекомендацій:

1. На відміну від досліджень [38]-[44], де зразки друкуються лежачи на платформі, для досліджень на розтяг між шарами, зразки друкуються вертикально.

2. В дослідженнях [38]-[44] за один раз друкуються певна кількість зразків. Для досліджень на розтяг між шарами це не припустимо, адже при

виготовленні групи зразків, присутня велика кількість переходів, що призводить до великої кількості дефектних місць. Можлива присутність полімерного “павутиння” або місць недоекструзії.

3. Основні параметри друку: тип матеріалу – PLA; діаметр сопла $d_{\text{сопла}} = 0,5$ мм, товщина шару $\Delta_{\text{шару}} = 0,2$ мм, охолодження – 100%.

4. Для досліджень друкується зразки при наступних змінних параметрах: швидкість друку $V_{\text{др}} = 30, 40, 50$ та 70 мм/с; температура друку $t_{\text{друку}} = 190, 200, 210, 220, 230, 240$ та 250 °С. Геометрія зразків також змінна: товщина зразків $t_{\text{зр}} = 1, 1.5$ та 2 мм або $2,3$ та 4 діаметри сопла $d_{\text{сопла}}$ відповідно.

5. Після друку кінці зразків, що затискаються в губки, необхідно оплавити термоножем. Така операція додає додаткової міцності і зразок не руйнується при затисканні.



Рисунок 3.7 – Зразок та збільшене зображення ділянки зразку

3.2.2 Порядок проведення випробувань на розтяг

1. Перед кожною групою дослідів тензодатчик калібрують за допомогою еталонного вантажу.

2. Зразки фіксуються гвинтами в затискачах. Потрібно слідкувати, щоб сила затягування гвинтів не деформувала зразок.

3. Фіксація зразків до нижньої губки не жорстка, на початку руху тягнучого пристрою є холостий хід. Це забезпечує відсутність впливу стартових ривків на зразок.

4. Враховується той результат, в якому руйнування зразків відбувається по межі шару та знаходиться на найвужчій ділянці на певній відстані від затискачів.

5. Результат відповідає показам максимального зусилля тензодатчика (виводиться на інтерфейс програмного забезпечення в момент припинення дії зусилля на розтяг).

6. Результат відповідає показам максимального зусилля тензодатчика (виводиться на інтерфейс програмного забезпечення в момент припинення дії зусилля).

7. Відпрацьований зразок виймається з затискачів, тягнучий механізм повертається в нульове положення і для кожного типу зразків проводиться випробовування на розтяг 20 разів.

3.2.3 План досліджень

Основними параметрами просторового друку є товщина шару, температура плавлення філаменту та швидкість руху екструдера. Розглянемо як впливає кожен з параметрів на друк та на злипання шарів матеріалу.

1. Товщина шару

При малих товщинах шару якість друку краще, проте при занадто малих значеннях тепло від нанесеного шару може деформувати попередній холодний шар. Це актуально в першу чергу для виробів з малою довжиною одного шару. При занадто великих товщинах шару падає площа контакту і різко погіршується адгезія. Вважається, що оптимальне значення товщини шару менше половини діаметра сопла ($h < 0,5d_{\text{сопла}}$) [82].

2. Температура плавлення

При занадто низькій температурі в'язкість полімеру висока, проходження по каналу екструдера ускладнене, адгезія з попередньо надрукованим холодним шаром погана або навіть відсутня. При поступовому збільшенні температури данні параметри покращуються.

Якщо температура занадто висока, то відбувається стрімке падіння в'язкості полімеру, внаслідок чого матеріал не встигає достатньо охолонути і розтікається. Це призводить до утворення зазорів між шарами, внаслідок чого адгезія погіршується.

3. Швидкість руху екструдера

Якщо головка екструдера переміщується занадто повільно, то тепло сопла може деформувати попередній холодний шар, проте на практиці така ситуація доволі рідкісна і сопло не затримується на достатньо довгий час в одній точці, щоб встигнути прогріти попередній шар. Проте такі ситуації можливі для виробів з занадто малою довжиною одного шару.

Збільшенні швидкості руху призводить до того, що матеріал швидше проходить зону плавлення екструдера. При високих значеннях швидкості матеріал не достатньо прогрівається, має нижчу в'язкість або навіть не проплавляється всередині філаменту (особливо при соплах високого діаметру). Це в свою чергу також призводить до поганого злипання між шарами матеріалу.

Виходячи з цього було випробувано наступні групи зразків (Таблиця 3.3)

Таблиця 3.3 Типи дослідних друкованих зразків

№	Опис зразків
1	З мінімальною площею перерізу (5 мм^2) та різними температурами друку ($t_{\text{друку}} = 190 \dots 250^\circ\text{C}$)
2	З різною площею перерізу ($S_{\text{пер}} = 5, 10, 15 \text{ та } 20 \text{ мм}^2$)
3	Зразки з різною товщиною шару ($\Delta_{\text{шару}} = 0,1 \dots 0,4 \text{ мм}$)
4	З різною швидкістю друку ($V_{\text{друку}} = 10 \dots 70 \text{ мм/с}$)
5	Зразки піддані термообробці та опроміненню
6	Зразки з дециметровою шкалою
7	Зразки з кратним збільшенням маси та однаковою статистикою руху друкувальної головки (відсоток холостих та робочих переміщень від загальної довжини траєкторії друку)

3.3 Розрахунок похибок дослідження

3.3.1 Методика розрахунку похибок прямих вимірювань

Визначення похибки середнього результату вимірювань (як прямих, так і непрямих) фізичних величин здійснюється за методикою, наведеною в праці [81].

Так, похибку середнього результату прямих вимірювань фізичних величин виконується в такій послідовності.

Дослідно-інструментальну помилку середнього результату вимірювань фізичної величини \bar{x} визначають за залежністю:

$$\sigma_{\text{дп}}(\bar{x}) = \sqrt{\sigma_{\text{пвп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2}, \quad (3.1)$$

де $\sigma_{\text{пвп}}$, $\sigma_{\text{пр}}$, $\sigma_{\text{окр}}$ – похибки первинного вимірювального перетворювача, приладу та округлення, відповідно:

$$\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дпп}}}{3}, \quad (3.2)$$

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma_o}{100} D_{\text{вим}} \right), \quad (3.3)$$

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}}. \quad (3.4)$$

де $\Delta_{\text{дпп}}$ – довідникова похибка приладу;

γ_o – клас точності приладу;

$D_{\text{вим}}$ – діапазон вимірювання приладу;

C – ціна поділки шкали (ступінь дискретизації цифрового відліку) приладу.

Випадкова помилка середнього результату становить

$$\theta(\bar{x}) = \xi \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}, \quad (3.5)$$

де x_i – i -й результат вимірювання;

ξ – коефіцієнт Стюдента, який залежить від довірчої імовірності P_δ і кількості вимірювань n .

Повна похибка прямого вимірювання фізичної величини обчислюється за формулою:

$$\sigma(\bar{x}) = \sqrt{\sigma_{\text{дип}}^2(\bar{x}) + \theta^2(\bar{x})}, \quad (3.6)$$

а значення фізичної величини становитиме

$$x = \bar{x} \pm \sigma(\bar{x}). \quad (3.7)$$

3.3.2 Розрахунок похибки вимірювання зусилля розтягу

Похибка вимірювання зусилля розтягу згідно з (3.2) дорівнює

$$\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дип}}}{3} = \pm \frac{0,05}{3} = \pm 0,0167 \text{ г},$$

де довідникова похибка тензодатчика YZC-516C становить:

$$\Delta_{\text{дип}} = \pm 0,05 \text{ г}.$$

Похибка приладу згідно з (3.3) дорівнює

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma_\circ}{100} D_{\text{вим}} \right) = \frac{1}{3} \left(\frac{0,05}{100} \cdot (100000 - 0,1) \right) = 16,67 \text{ г}.$$

Похибка округлення згідно з (3.4) становить

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}} = \frac{0,1}{\sqrt{12}} = 0,0289 \text{ г}.$$

Значення дослідно-інструментальної помилки визначаємо згідно з (3.1):

$$\sigma_{\text{дін}}(\bar{T}) = \sqrt{\sigma_{\text{пвп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,0167^2 + 16,67^2 + 0,0289^2} = 16,67 \text{ г.}$$

Тепер визначимо величину випадкової помилки середнього результату вимірювання зусилля. Для визначення випадкової похибки проводили п'ять вимірювань зусилля, які становили 10; 9; 9,5; 10; 10 г.

Середнє арифметичне зусилля становить:

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i = \frac{1}{5} (10 + 9 + 9,5 + 10 + 10) = 9,7$$

Тоді випадкова помилка середнього результату становить:

$$\begin{aligned} \theta(\bar{P}) &= \xi \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{P} - P_i)^2} = \\ &= 2,6 \sqrt{\frac{1}{5(5-1)} [(10-9,7)^2 + (9-9,7)^2 + (9,5-9,7)^2 + (10-9,7)^2 + (10-9,7)^2]} = \\ &= 0,313 \text{ г,} \end{aligned}$$

де $\xi=2,6$ – значення коефіцієнта Стюдента для $R_d = 0,95$ і $n = 5$ [81].

Повна похибка прямого вимірювання зусилля (3.6):

$$\sigma(\bar{m}) = \sqrt{16,67^2 + 0,313^2} = 16,673 \text{ г.}$$

Величина зусилля відповідно до (3.7) становить:

$$m = \bar{m} \pm \sigma(\bar{m}) = \bar{m} \pm 16,673 \text{ г.}$$

У більшості вимірювань фізичних величин значення випадкової помилки їх середнього результату значно менше від значення дослідно-інструментальної помилки, тому надалі для визначення повної похибки прямого вимірювання фізичних величин до уваги приймається тільки дослідно-інструментальна помилка, тобто приймаємо, що $\sigma(\bar{x}) = \sigma_{\text{дін}}(\bar{x})$.

3.3.3 Розрахунок похибки вимірювання відхилення форми

Похибка вимірювання згідно з (3.2) дорівнює

$$\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дпп}}}{3} = \pm \frac{0,1}{3} = \pm 0,033 \text{ мм},$$

де довідникова похибка 3D сканера ARTEC EVA становить:

$$\Delta_{\text{дпп}} = \pm 0,1 \text{ мм}.$$

Похибка приладу згідно з (3.3) дорівнює

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma_{\circ}}{100} D_{\text{вим}} \right) = \frac{1}{3} \left(\frac{0,01}{100} \cdot (400 - 0,1) \right) = 0,0133$$

Похибка округлення згідно з (3.4) становить

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}} = \frac{0,01}{\sqrt{12}} = 0,0028 \text{ мм}.$$

Значення дослідно-інструментальної помилки визначаємо згідно з (3.1):

$$\sigma_{\text{дп}}(\bar{T}) = \sqrt{\sigma_{\text{пвп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,033^2 + 0,0133^2 + 0,0028^2} = 0,0357 \text{ мм}.$$

Тепер визначимо величину випадкової помилки середнього результату вимірювання відстані. Для визначення випадкової похибки проводили п'ять вимірювань відстані, які становили 100; 100,2; 100,1; 99,9; 100 мм.

Середнє арифметичне відстані становить

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i = \frac{1}{5} (100 + 100,2 + 100,1 + 99,9 + 100) = 100,04 \text{ мм}$$

Тоді випадкова помилка середнього результату становить

$$\begin{aligned} \theta(\bar{l}) &= \xi \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{m} - m_i)^2} = \\ &= 2,6 \sqrt{\frac{1}{5(5-1)} \left[(100 - 100,04)^2 + (100,2 - 100,04)^2 + (100,1 - 100,04)^2 + \right. \\ &\quad \left. (99,9 - 100,04)^2 + (100 - 100,04)^2 \right]} = \\ &= 0,109 \text{ мм}, \end{aligned}$$

де $\xi=2,6$ – значення коефіцієнта Стьюдента для $P_d = 0,95$ і $n = 5$.

Повна похибка прямого вимірювання відстані (3.6):

$$\sigma(\bar{l}) = \sqrt{0,0357^2 + 0,109^2} = 0,114 \text{ мм.}$$

Значення ваги відповідно до (3.7) становить

$$l = \bar{l} \pm \sigma(\bar{l}) = \bar{l} \pm 0,114 \text{ мм.}$$

3.3.4 Розрахунок похибки вимірювання товщини

Похибка товщини згідно з (3.2) дорівнює

$$\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дпп}}}{3} = \pm \frac{0,005}{3} = \pm 0,00167 \text{ мм,}$$

де довідникова похибка електронного штангельциркуля становить:

$$\Delta_{\text{дпп}} = \pm 0,005 \text{ мм.}$$

Похибка електронного штангельциркуля згідно з (3.3) дорівнює

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma_{\circ}}{100} D_{\text{вим}} \right) = \frac{1}{3} \left(\frac{0,05}{100} \cdot (100 - 0,1) \right) = 0,0167$$

Похибка округлення згідно з (3.4) становить

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}} = \frac{0,01}{\sqrt{12}} = 0,0029 \text{ мм.}$$

Значення дослідно-інструментальної помилки визначаємо згідно з (3.1):

$$\sigma_{\text{дінп}}(\bar{t}) = \sqrt{\sigma_{\text{пвп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,00167^2 + 0,0167^2 + 0,0029^2} = 0,017 \text{ мм.}$$

Тепер визначимо величину випадкової помилки середнього результату вимірювання товщини. Для визначення випадкової похибки проводили чотири вимірювання товщин, які становили 5; 5; 5,03; 4,98; 5,01 мм.

Середнє арифметичне товщини становить:

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = \frac{1}{5} (5 + 5 + 5,03 + 4,98 + 5,01) = 5,004 \text{ мм.}$$

Тоді випадкова помилка середнього результату становить:

$$\begin{aligned} \theta(\bar{t}) &= \xi \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{t} - t_i)^2} = \\ &= 2,6 \sqrt{\frac{1}{5(5-1)} [(5 - 5,004)^2 + (5 - 5,004)^2 + (5,03 - 5,004)^2 + (4,98 - 5,004)^2 + (5,01 - 5,004)^2]} = \\ &= 0,0211 \text{ мм,} \end{aligned}$$

де $\xi=2,6$ – значення коефіцієнта Стюдента для $P_d = 0,95$ і $n = 5$.

Повна похибка прямого вимірювання товщини (3.6):

$$\sigma(\bar{t}) = \sqrt{0,017^2 + 0,0211^2} = 0,0271 \text{ мм.}$$

Значення товщини відповідно до (3.7) становить:

$$t = \bar{t} \pm \sigma(\bar{t}) = \bar{t} \pm 0,0082 \text{ мм.}$$

3.4 Дослідження друкованих зразків на міцність

3.4.1 Дослідження витратного матеріалу (філаменту)

Для визначення межі міцності витратного матеріалу проведено випробовування PLA (Polylactide) філаменту ($d_{fil} = 1,75 \pm 0,05$ мм) виробництва компанії U3DF (Україна). Середнє значення межі міцності при розтягу становить $[\sigma_{fil}] = 52,12$ МПа (Додаток А, Табл. А1).

Дана величина буде використана для порівняння з міцністю з друкованими зразками і прийнята, як межа міцності при розтягу для аналогічних зразків виготовлених методом лиття під тиском.

3.4.2 Дослідження зразків зі сталим перерізом та швидкістю руху екструдера, але різною температурою друку

Рекомендованою виробником температурою друку є температура в межах $t_{друку} = 200 \dots 220$ °С. Для випробувань були виготовленні групи зразків при температурах від $t_{друку} = 190$ °С до 250°С з кроком 10°С. Перші чотири значення є найбільш поширеними значеннями під час друку. Було випробувано по 20 зразків для кожного з температурних режимів.

Для кожної групи експериментів була виявлена певна кількість результатів, що випадає з загальної картини та не лежить в межах досліджень інших авторів [38-44]. Проте зі збільшенням температури друку, для кожної групи зразків кількість таких результатів зменшувалась (рис. 3.8).

Очевидним є вплив температури друку на якість поєднання шарів між собою, причому за низьких температур друку є місце недостатнє наплавлення, а при високих – перекристалізація полімеру, що також негативно впливає на міжшарову адгезію.

Друк при критично високих температурах взагалі неможливий, адже попередній шар не встигає затвердіти. Для недефектних зразків кожної групи було визначено середнє значення границі міцності [$\sigma_{\text{сеп.}}$] (рис. 3.9).

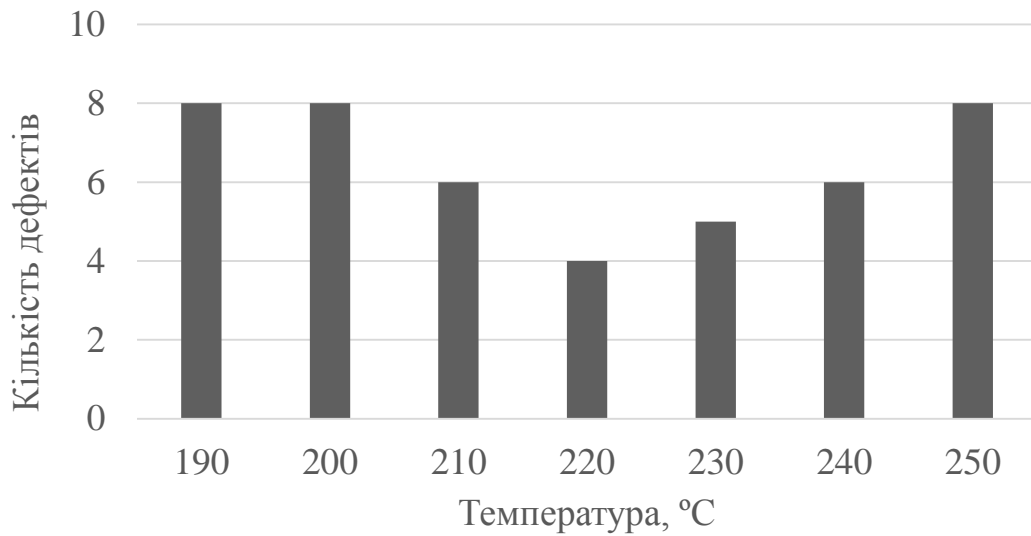


Рисунок 3.8 – Кількість зразків з дефектами в залежності від температури друку

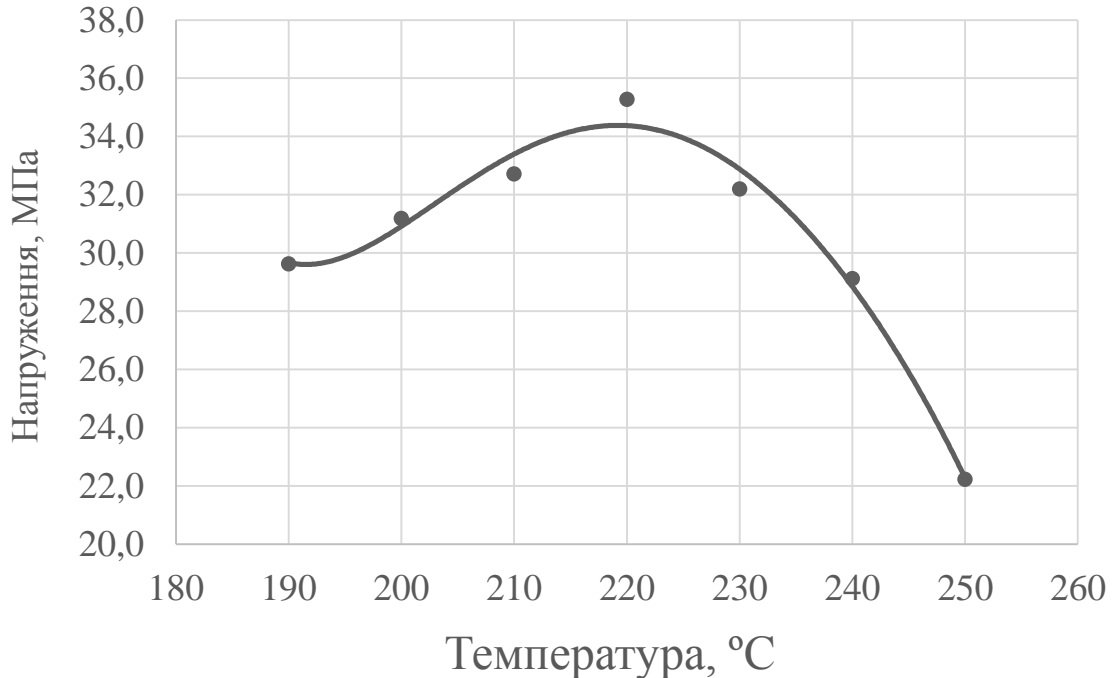


Рисунок 3.9 – Границя міцності на розтяг для груп зразків в залежності від температури друку

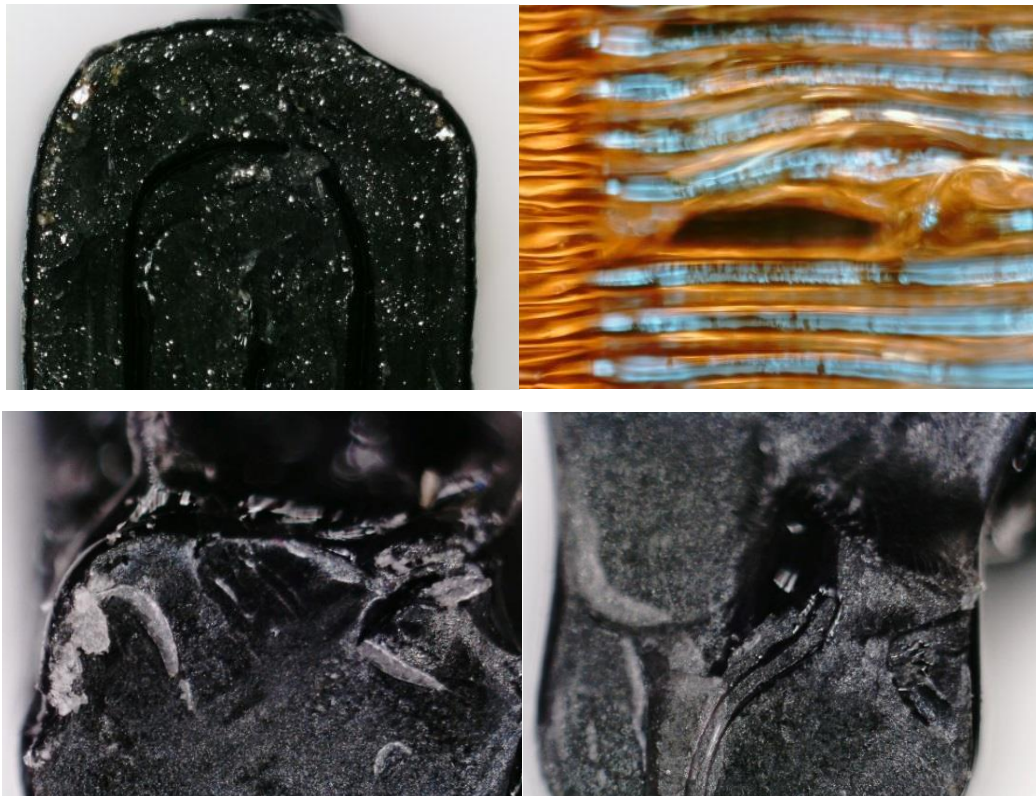
Повні результати випробувань наведені в Додатку А, Табл. А2.

Отримані результати показали залежність міцності зразків від температури друку. Найвище значення межі міцності при розтягу виявилось на 30% менше за міцність аналогічних зразків виготовлених методом лиття під тиском.

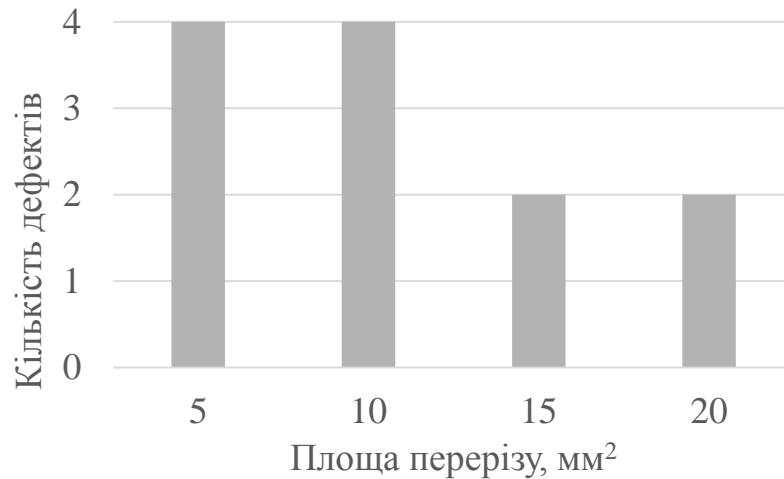
Виходячи з результатів, очевидно, що оптимальною температурою друку є $t_{\text{друку}} = 220^{\circ}\text{C}$. Тому для наступних етапів випробувань, зразки виготовлялись при $t_{\text{друку}} = 220^{\circ}\text{C}$.

3.4.3 Дослідження зразків з різним перерізом та сталою швидкістю руху екструдера та температурою друку

На наступному етапі переріз зразків поступово збільшувалося на 0,5мм (товщина одного шару). Було виготовлено по 20 зразків з площами перерізу $S_{\text{пер}} = 10, 15$ та 20 мм^2 . В результаті було виявлено, що значення межі міцності при розтягу практично не змінилось, а кількість дефектних зразків поступово зменшувалась при збільшенні розміру перерізу (рис. 3.10).



a)



б)

Рисунок 3.10 – Дефекти на межі контакту шарів: а) макрофото межі контакту шарів з порожнинами; б) кількість зразків з низькою міцністю в досліджуваній групі в залежності від площі перерізу

На рис. 3.10 (а) показані макрознімки перерізу зразків на межі контакту шарів. На фото видно відсутність суцільності внутрішньої структури друкованих виробів, існують порожнини між нанесеним термопластичним полімерним матеріалом в межах одного шару та між двома сусідніми, а також присутня недоекструзія під час руху друкувальної головки. Кількість дефектів зменшується під час стабільного руху друкувальної головки, тому частка загального об'єму порожнин також зменшується. Виходячи з цього, величина міжшарової взаємодії є вищою для зразків з більшою площею поперечного перерізу та мінімальною кількістю замкнутих контурів в межах одного шару.

Повні результати випробувань наведені в Додатку А, Табл. А3.

3.4.4 Дослідження друкованих зразків з різною товщиною наплавленого шару

Товщина шару один з головних параметрів, що визначає якість та продуктивність друку. Прийнято, що товщина шару повинна не перевищувати половини діаметра сопла: $\Delta_{шару} \leq 0,5 d_{сопла}$. Для визначення впливу цього

параметру на міцність, було виготовлено зразки з $\Delta_{шару} = 0,1 \dots 0,35$ мм з кроком 0,05 мм. Результати випробувань представлені на (рис. 3.11).

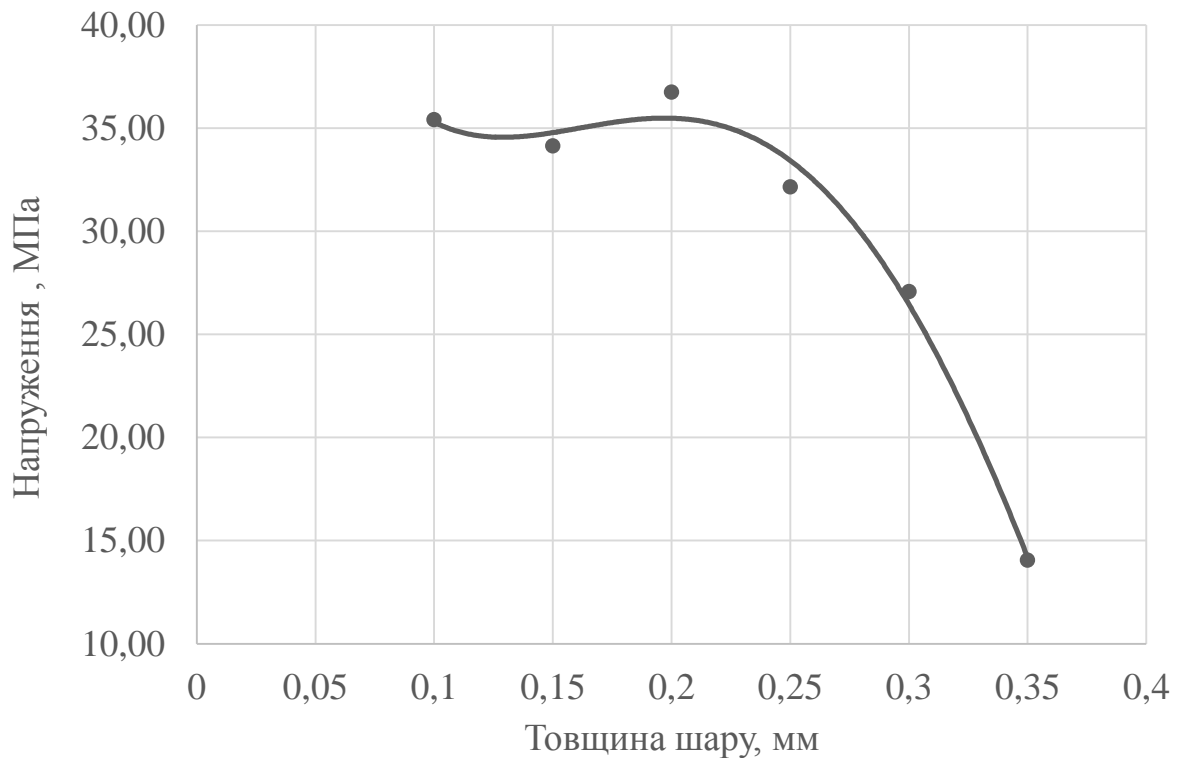


Рисунок 3.11 - Границя міцності на розтяг друкованих зразків в залежності від товщини шару

Виявилось, що зразки з товщиною шару 0,1 та 0,2 мм мають приблизно однакові показники міцності при розтягу, а зразки з товщиною 0,15 мм дещо слабші за них. З поступовим збільшенням товщини шару, міцність різко падає, якість бічної поверхні падає, при подальшому збільшенні товщини друк стає неможливим.

Повні результати випробувань наведені в Додатку А, Табл. А4.

3.4.5 Дослідження зразків з максимальним перерізом та різною швидкістю руху екструдера

Для подальших випробувань надруковані зразки з перерізом $S_{пер}=20$ мм² при різних швидкостях друку $V_{друку} = 30, 40, 50, 60$ та 70 мм/с). Даний параметр

є одним із основних та впливає на продуктивність установки, якість друку та навантаження на рухомі органи. Виявлено, що зі зростанням швидкості друку почала знижуватись візуальна якість зразків, кількість дефектних зразків для кожної групи стрімко зростала (рис. 3.12).

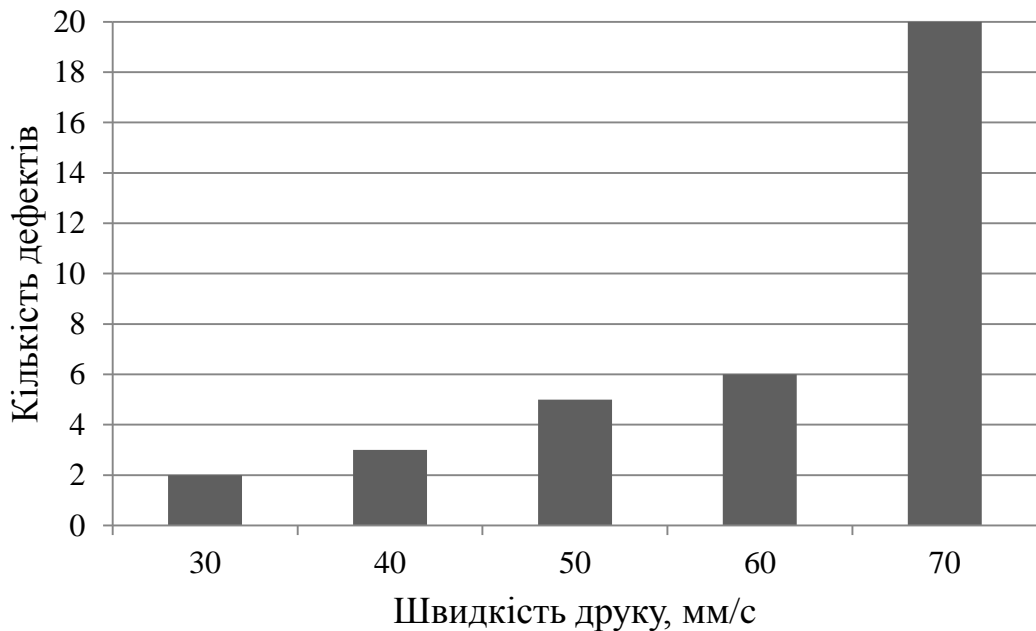


Рисунок 3.12 - Кількість зразків з дефектами в залежності від швидкості друку

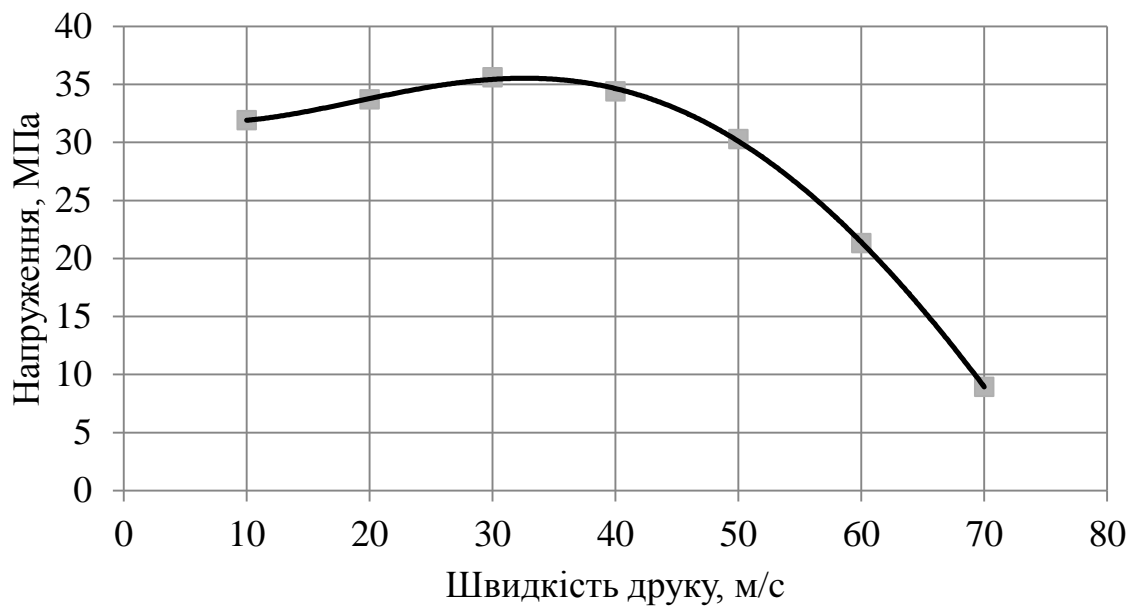


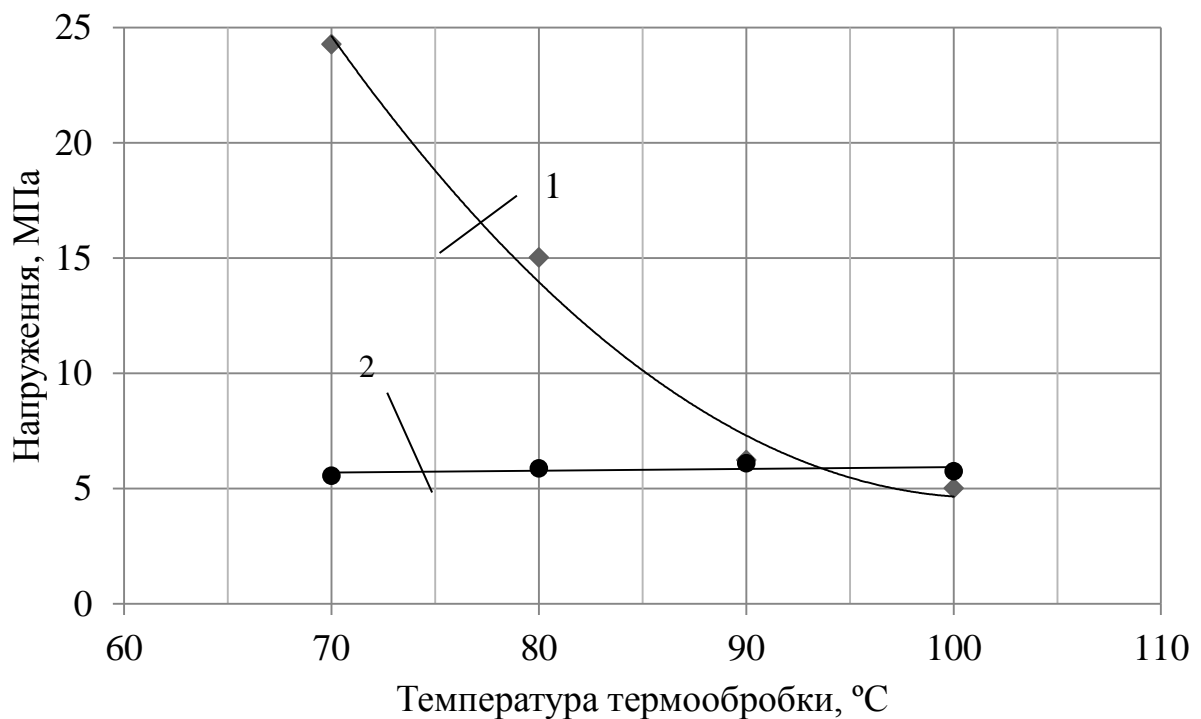
Рисунок 3.13 – Границя міцності на розтяг друкованих зразків в залежності від швидкості друку

На вищих швидкостях ($V_{друку} \geq 70$ мм/с) друк перестає бути можливим. Найкращі показники міцності виявились у зразків надрукованих при $V_{друку} = 30$ мм/с. При чому зразки друковані на нижчих швидкостях ($V_{друку} = 10$ та 20 мм/с) мають меншу міцність (рис. 3.13).

Повні результати випробувань наведені в Додатку А, Табл. А5.

3.4.6 Дослідження впливу термообробки та опромінення на міжшарову адгезію

Для дослідження впливу термообробки зразки було покрито шаром азбесту та поміщено в піч при температурах $t_{терм} = 70, 80, 90$ та 100°C на 1 та 2 год. Після цього зразки охололи при кімнатній температурі та були випробувані на міцність. Міцність зразків впала в декілька разів, а зразки, що знаходились довший час в печі, мали однаково низьку міцність незалежно від температури витримки (рис. 3.14).



Час витримки: 1- 1год; 2 – 2год

Рисунок 3.14 – Границя міцності на розтяг друкованих зразків після термообробки

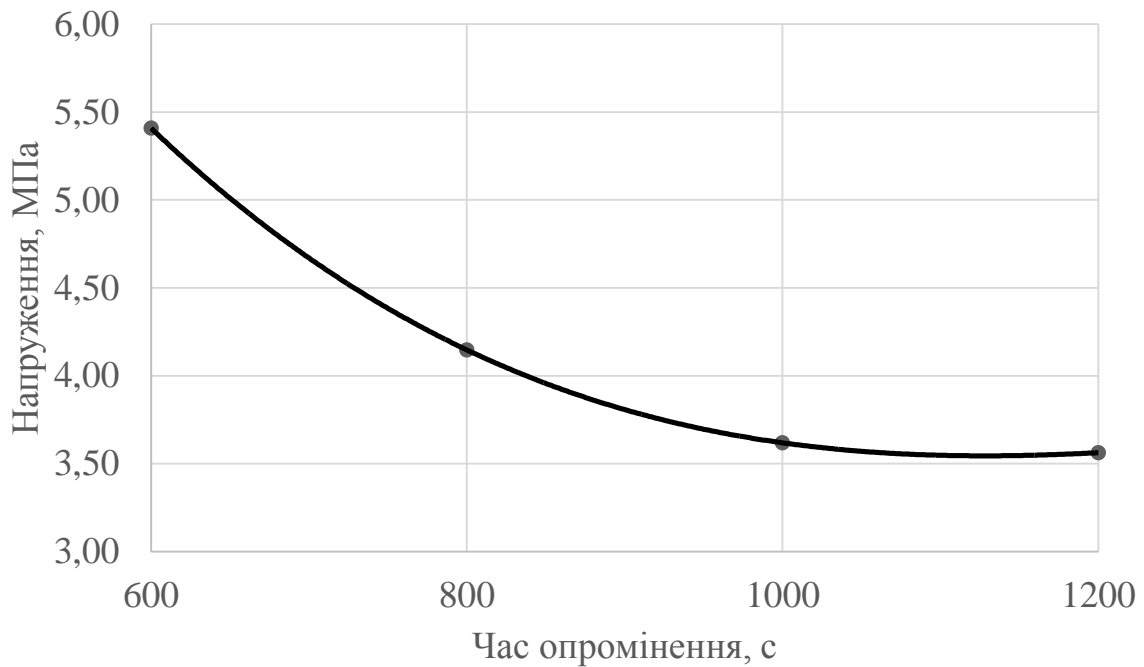


Рисунок 3.15 – Границя міцності на розтяг друкованих зразків після опромінення

Також інша група була піддано мікрохвильовому опроміненню на час від 600 до 1200 с. Міцність зразків поступово падала і після певного часу опромінення досягала свого кінцевого мінімального значення (рис. 3.15).

Повні результати випробувань наведені в Додатку А, Табл. А6.

3.4.7 Дослідження геометричних параметрів наплавленого шару

Виходячи з попередніх досліджень було виявлено нерівномірність результатів для кожного з типів зразків. До того ж в кожній групі випробувань на міцність була певна кількість експериментів, що випадають з загальної картини. Тому необхідно детально дослідити детально геометричні параметри кожного окремого шару. Для цього було виготовлено 10 прямокутних зразків довжиною 100 мм, висотою 20 мм і товщиною рівною діаметру сопла 0,5 мм (Рисунок 3.16).

Параметри друку відповідали найбільш оптимальним згідно попередніх результатів ($V_{друку} = 30\text{мм/с}$, температура друку $t_{друку} = 220^\circ\text{C}$, $\Delta_{шару} = 0,2\text{ мм}$).

Отримані зразки було розрізано через кожні 10 мм. Для отриманих сегментів було виміряно товщину та масу. Зміна товщини шару на рис. 3.17.

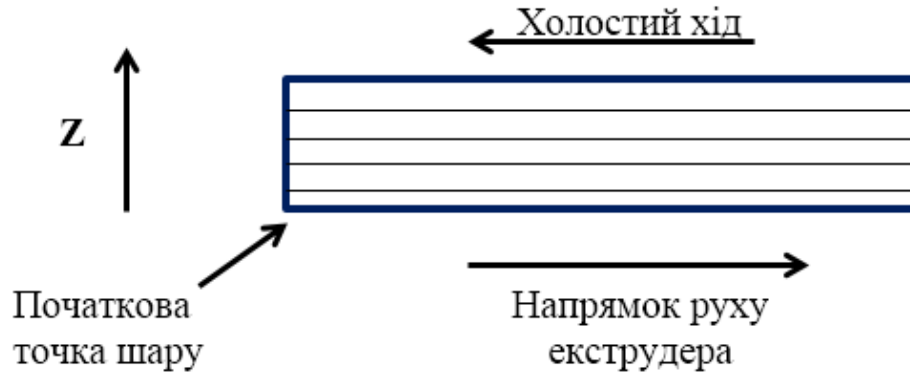


Рисунок 3.16 – Схема друку дослідного зразка

Виходячи з результатів було виявлено, що товщина шару, а отже і розхід матеріалу друкувальною головкою за одиницю часу, є нерівномірною (рис. 3.17, 3.18).

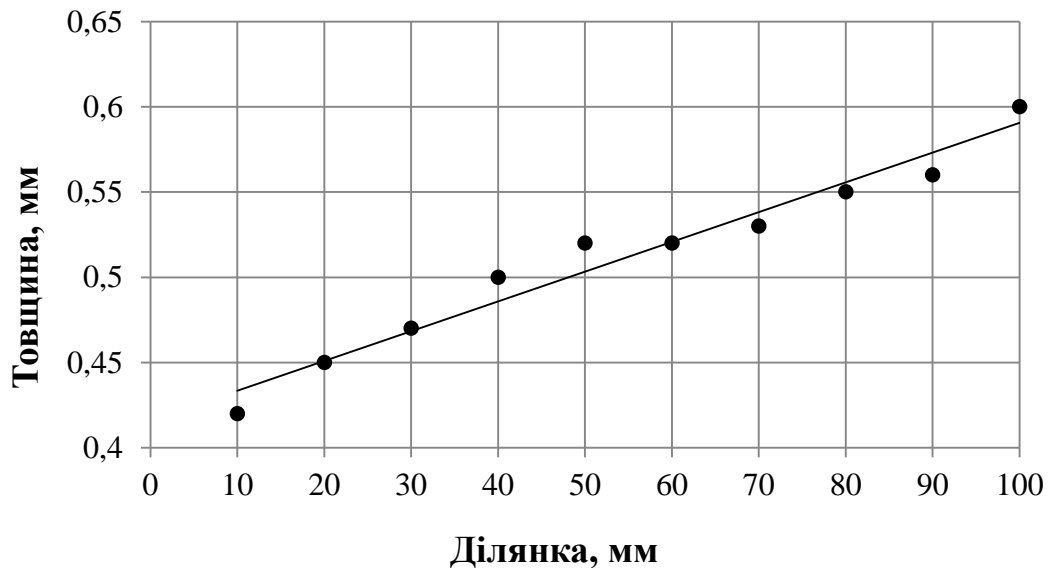


Рисунок 3.17 Зміна товщини наплавленого шару від початкової точки друку

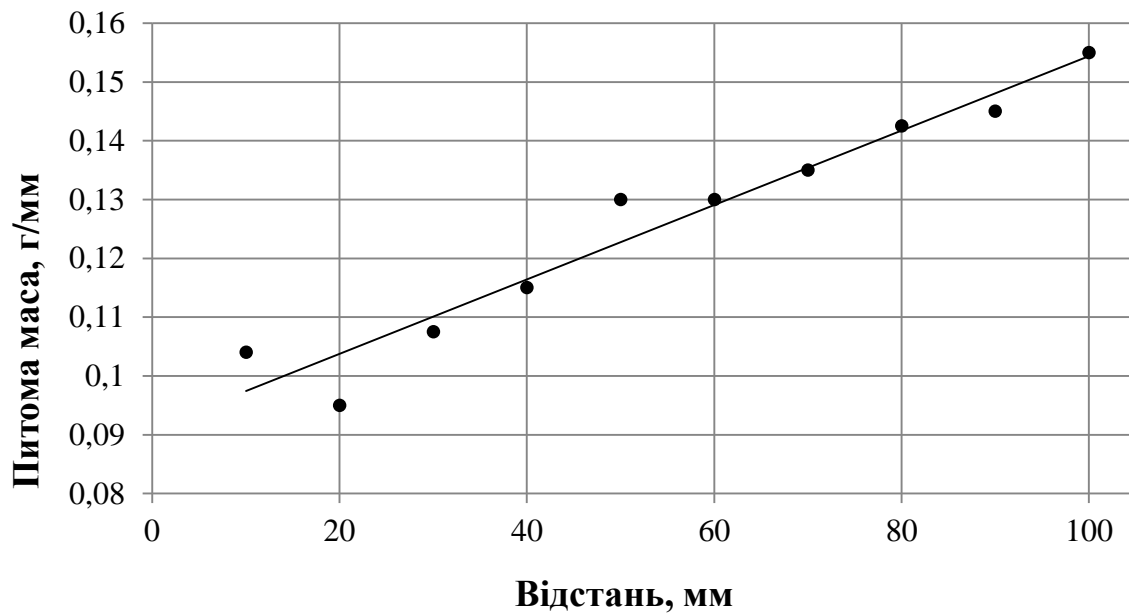


Рисунок 3.18 – Зміна розходу матеріалу друкувальної головки від початкової точки друку

На початку товщина менша за діаметр сопла, поступово зростає і до кінця шару стає більшою за діаметр сопла. Тобто на початку руху присутня недоекструзія, а наприкінці “розбухання” шару. Також на проміжку від початку шару була присутня деламінація (розшарування). Така картина спостерігається на першій третині зразка. Очевидно, що присутність таких місць послаблює загальну міцність зразка.

Результати вимірювань наведені в Додатку А, Табл. А7.

3.4.8 Дослідження динаміки нанесення матеріалу

Для визначення динаміки побудови шару зроблено наступне:

1. Змодельовано зразки довжиною 100 мм та висотою 20 мм зі шкалою у вигляді стінок через кожні 10мм. Товщина зразків рівна діаметру сопла ($t_{зразка} = d_{сопла}$).
2. Параметри друку відповідали найоптимальнішим режимам відповідно до попередніх досліджень: $t_{друку} = 220^{\circ}\text{C}$; $V_{др} = 30\text{мм/с}$. Перехід на

наступний шар відбувався в одній точці, тому матеріал наноситься при переміщенні екструдера зліва на право, в зворотному напрямку хід холостий.

3. Зразок розміщувався вздовж осі X 3D принтера. Навпроти на рівні робочої платформи встановлюється відеокамера, що фокусується на друкованому зразку (рис. 3.19).

4. Після завершення побудови шкали, камера вмикається та знімається процес друку декількох шарів. Для одного зразка зйомка повторюється 2-3 рази.

5. Дані операції необхідно зробити для принтерів з механікою типу Prusa та H-Bot.

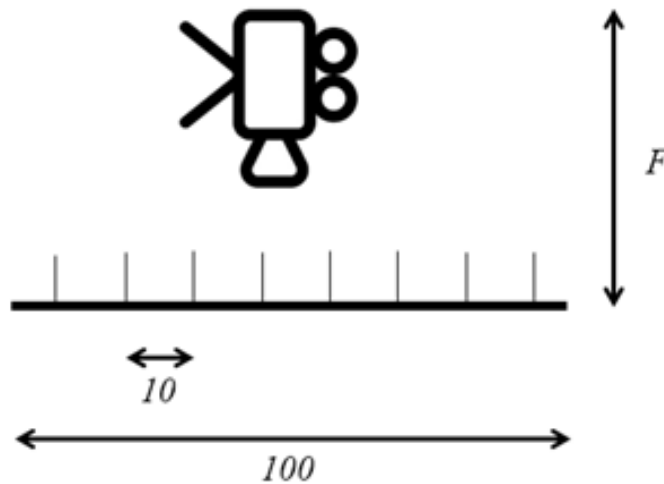


Рисунок 3.19 – Схема дослідження процесу нанесення шару витратного матеріалу

6. Для знятих відео обираються кадри, що відповідають процесу побудови одного шару від початку нанесення матеріалу до повернення екструдера в нульове положення зворотнім холостим ходом.

7. Кожен уривок переглядається покадрово і рахується кількість кадрів для кожної ділянки в 10 мм. Рахується кількість кадрів на зупинку в нульовій точці шару (рис. 3.20).

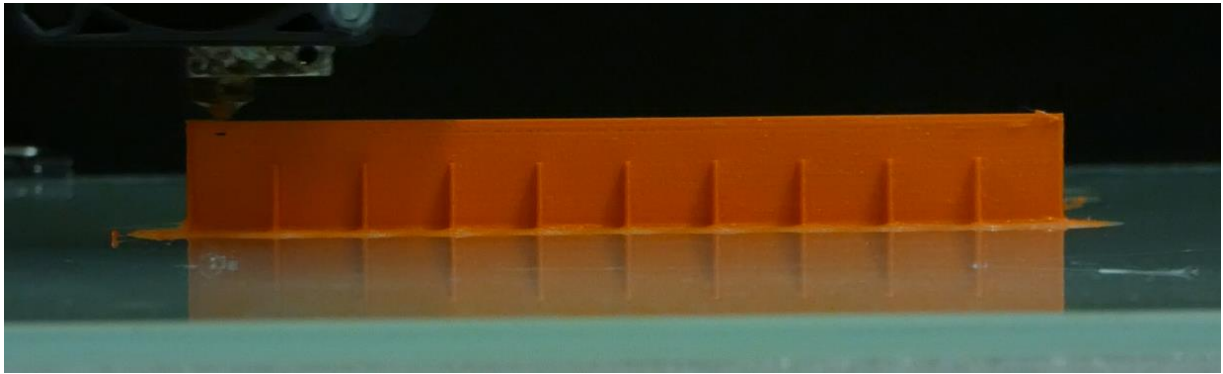


Рисунок 3.20 – Процес друку дослідного зразка

На графіку (рис. 3.21) видно, що друкувальна головка Prusa і3 певний час перебувала на місці, після чого почала свій рух, проте не досягла встановленого значення швидкості (Таблиця 3.4). В кінцевій точці шару була певна зупинка та початок холостого ходу, де вдалось досягнути заданого значення швидкості.

Результуючий час друку склав: $T_{факт} = 5,83$ с.

Якби швидкість друку була постійною і відповідала заданим, тоді час друку склав би:

$$T_{теор} = L/V_{друку} = 200/40 = 5 \text{ с.}$$

Отже, відносна затримка друку для одного шару для Prusa і3 становить:

$$T' = \frac{T_{факт.} - T_{теор.}}{T_{факт.}} * 100\% = \frac{5,83 - 5}{5} * 100\% = 16,6\%.$$

На графіку (рис. 3.22) видно, що друкувальна головка H-Vot певний час перебувала на місці, після чого почала свій рух, і так само не досягла встановленого значення швидкості (Таблиця 3.4). Аналогічно з Prusa і3, в кінцевій точці шару була певна зупинка та початок холостого ходу, проте екструдер H-Vot так і не досягнув заданого значення швидкості для холостого ходу.

Результуючий час друку виявився більшим і склав: $T_{факт} = 7,033$ с.

Отже, відносна затримка друку для одного шару становить:

$$T' = \frac{T_{факт.} - T_{теор.}}{T_{факт.}} * 100\% = \frac{7,033 - 5}{5} * 100\% = 40$$

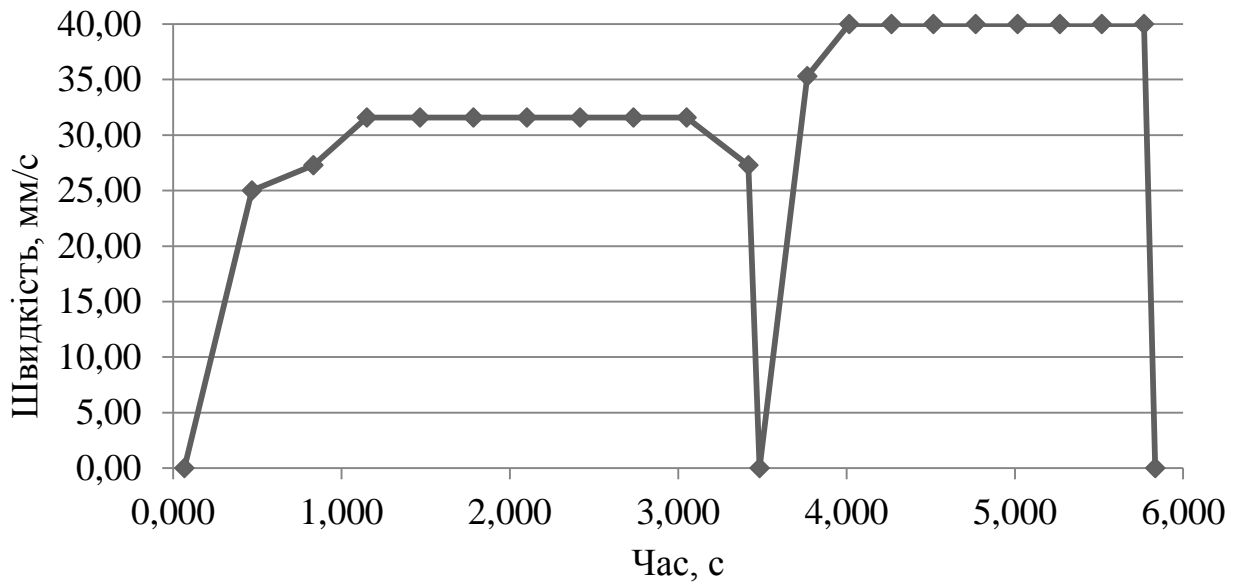


Рисунок 3.21 - Графік швидкості руху екструдера 3D-принтера з механікою Prusa i3

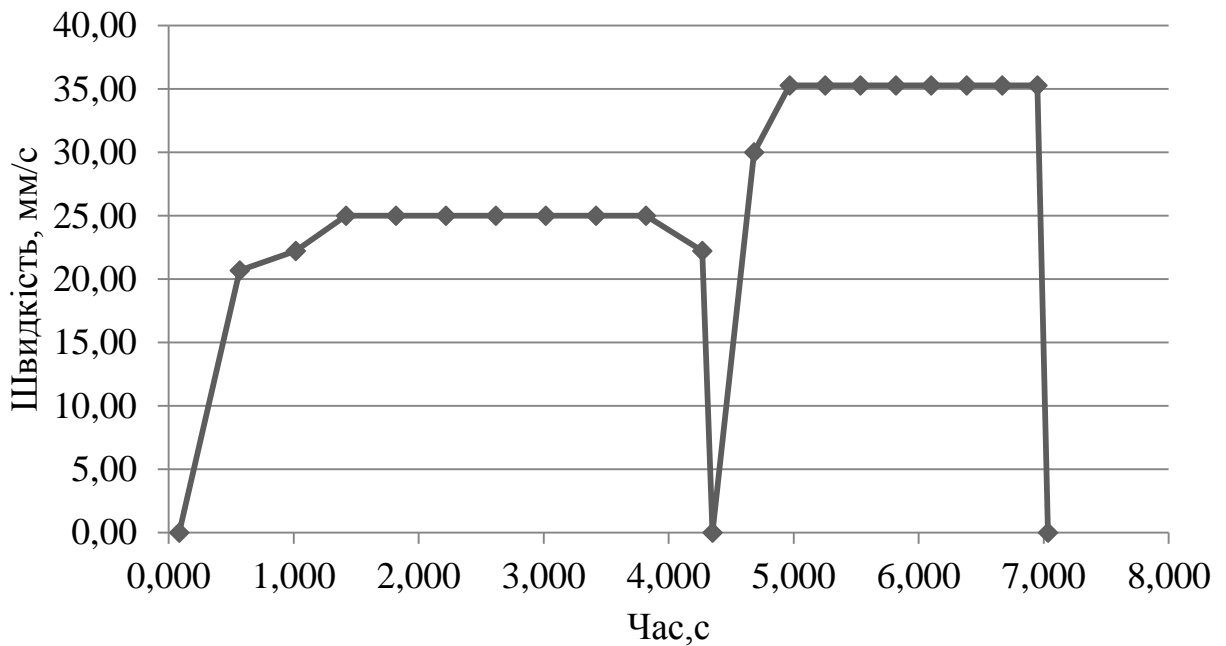


Рисунок 3.22 - Графік швидкості руху екструдера 3D-принтера з механікою H-Bot

Отримані результати показують динаміку руху екструдера вздовж шару. Данні по швидкостям показали відмінність від значень налаштувань в слайсері. Порівняння даних з налаштуваннями для обох типів механік наступні:

Таблиця 3.4 – Фактична швидкість руху екструдера для різних механік в порівнянні з встановленою

	Слайсер	Prusa I3	H-Bot
$V_{\text{друку}}, \text{ м/с}$	40	33	29
$V_{\text{хол.}}, \text{ м/с}$	40	40	35

Для обох типів механік виявилось, що фактична середня швидкість руху менша від заданих. При чому для кожного з типів механік ця відмінність різна. Для визначення відмінності визначимо різницю в часі друку зразків від теоретичної при різних швидкостях друку.

3.4.9 Дослідження продуктивності просторового друку в залежності від типу механіки

Для встановлення відмінності між теоретичним часом друку та фактичним було надруковано по 5 зразків на принтерах різних механік при різних швидкостях друку $V_{\text{друку}} = 20, 30, 40$ та 50 мм/с . Зразки являли собою вертикальну стінку, розміри якої поступово пропорційно збільшувались. Це дає змогу більш коректно оцінити залежність затримки процесу від часу друку при різних швидкостях переміщення екструдера, так як співвідношення холостих та робочих переміщень для кожної деталі однакові.

Виконавчий файл був однаковим для кожного 3D принтера, змінювались лише значення швидкості друку. Після кожного друку, зразок зважувався для визначення питомої витрати.

На рис. 3.23 показано залежність відносної затримки від часу друку для різних швидкостей переміщення виконавчих органів 3D принтера з механікою Prusa i3.

Встановлено, що зі збільшенням маси виробу зростає відносна затримка друку. Зі збільшенням швидкостей друку відносна затримка друку поступово зменшується.

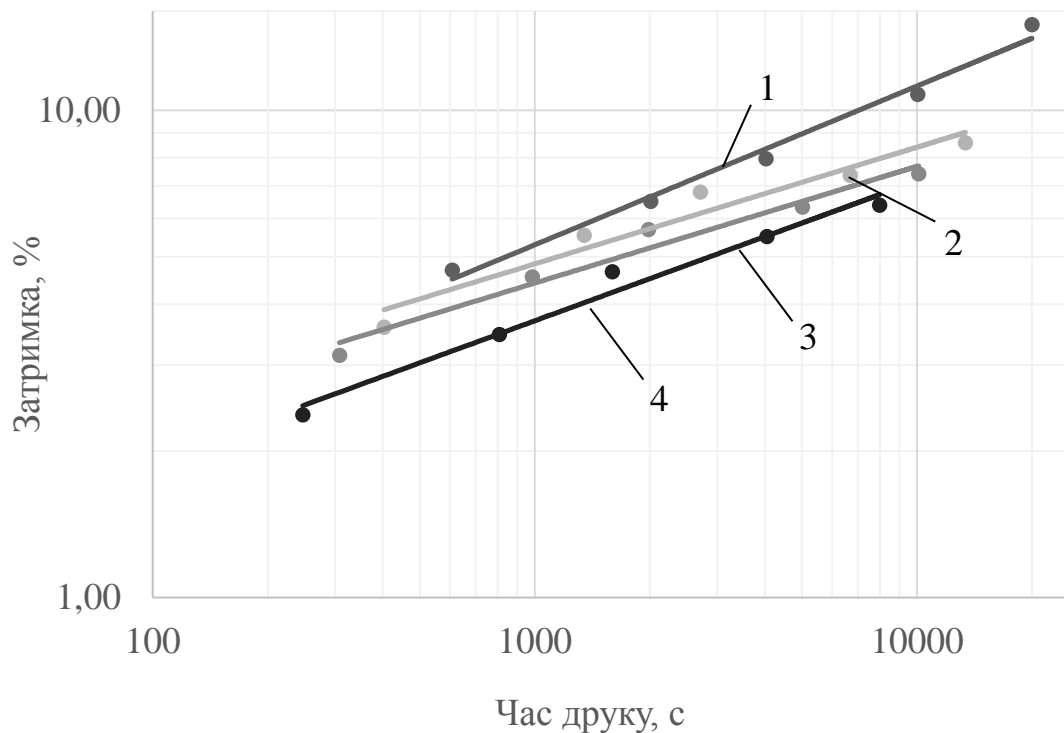
Провівши степеневу апроксимацію можливо встановити залежність фактичного часу друку від теоретичного для заданої швидкості друку для механіки типу Prusa i3:

$$T_{\text{факт}} = 0,5574 T_{\text{теор}}^{0,326} \text{ при } V_{\text{друку}} = 20 \text{ мм/с};$$

$$T_{\text{факт}} = 0,9261 T_{\text{теор}}^{0,2394} \text{ при } V_{\text{друку}} = 30 \text{ мм/с};$$

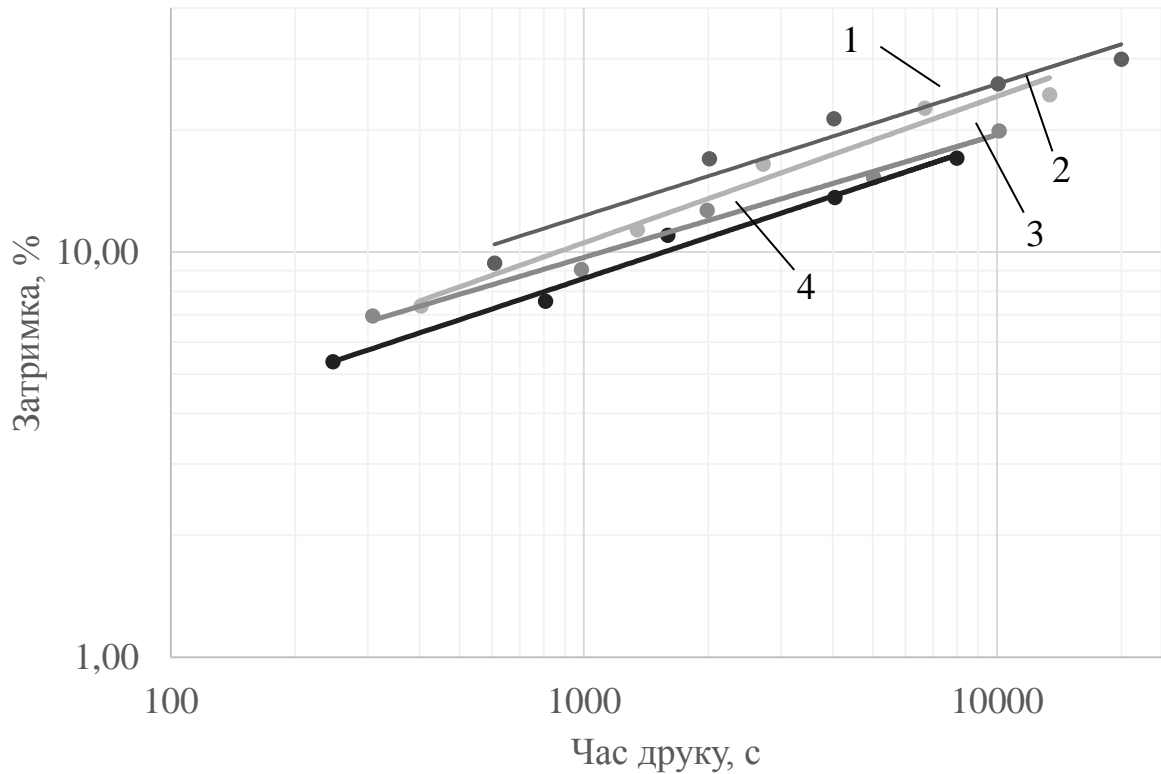
$$T_{\text{факт}} = 0,8454 T_{\text{теор}}^{0,2395} \text{ при } V_{\text{друку}} = 40 \text{ мм/с};$$

$$T_{\text{факт}} = 0,5092 T_{\text{теор}}^{0,2871} \text{ при } V_{\text{друку}} = 50 \text{ мм/с}.$$



Швидкість друку: 1 – 20 мм/с; 2 – 30 мм/с; 3 – 40 мм/с; 4 – 50 мм/с;

Рисунок 3.23 – Залежність відносної затримки від часу друку при різних швидкостях екструдера для механіки типу Prusa i3



Швидкість друку: 1 – 20 мм/с; 2 – 30 мм/с; 3 – 40 мм/с; 4 – 50 мм/с;

Рисунок 3.24 – Залежність відносної затримки від часу друку при різних швидкостях екструдера для механіки типу H-bot

На рис. 3.24 показано залежність відносної затримки від часу друку для різних швидкостей переміщення виконавчих органів 3D принтера з механікою H-Bot. Встановлено, що зі збільшенням маси виробу зростає відносна затримка друку. Зі збільшенням швидкостей друку відносна затримка друку поступово зменшується.

Провівши степеневу апроксимацію можливо встановити залежність фактичного часу друку від теоретичного для заданої швидкості друку для механіки типу H-bot:

$$T_{\text{факт}} = 1,3001 T_{\text{теор}}^{0,3252} \text{ при } V_{\text{друку}} = 20 \text{ мм/с};$$

$$T_{\text{факт}} = 0,8698 T_{\text{теор}}^{0,3612} \text{ при } V_{\text{друку}} = 30 \text{ мм/с};$$

$$T_{\text{факт}} = 1,1983 T_{\text{теор}}^{0,3028} \text{ при } V_{\text{друку}} = 40 \text{ мм/с};$$

$$T_{\text{факт}} = 0,835 T_{\text{теор}}^{0,3377} \text{ при } V_{\text{друку}} = 50 \text{ мм/с}.$$

В результаті було виявлено, що відхилення фактичного часу друку для механіки типу Prusa i3 було меншим, ніж для механіки типу H-Bot. Також встановлено, що зі зростанням швидкості друку відносна затримка поступово падає для обох механік, проте швидкість зменшення затримки для механіки H-Bot є меншою на 10-15%.

3.4.10 Визначення модулів пружності та зсуву

Для знаходження основних характеристик пружних властивостей проведено додаткове випробування суцільного матеріалу та друківаних зразків на розтяг та зсув. На рис. 3.25 зображено графік випробування суцільного матеріалу PLA (крива 1) та друківаного зразка (крива 2) на розтяг.

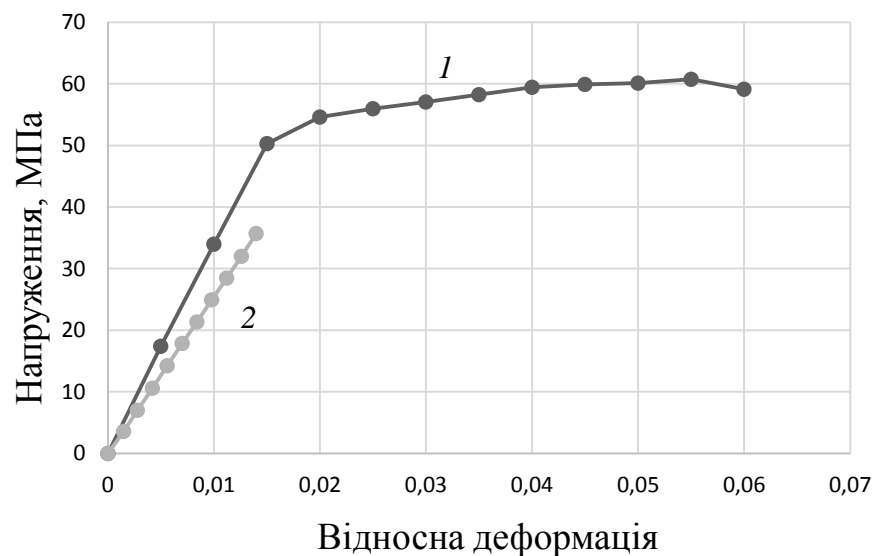


Рисунок 3.25 – Графік залежності напруження та відносної деформації при розтягу: 1 – суцільний матеріал, 2 – друківаний зразок

Згідно графіка можливо встановити модуль Юнга для витратного матеріалу та при розтягу друківаних зразків перпендикулярно шару. Отримані значення наступні:

$$E_{\text{вирп}} = 3,41 \text{ ГПа}; E_{\text{друк}} = 2,52 \text{ ГПа}$$

На рис. 3.26 зображено графік випробування суцільного матеріалу PLA (крива 1) та друківаного зразка (крива 2) на зсув.

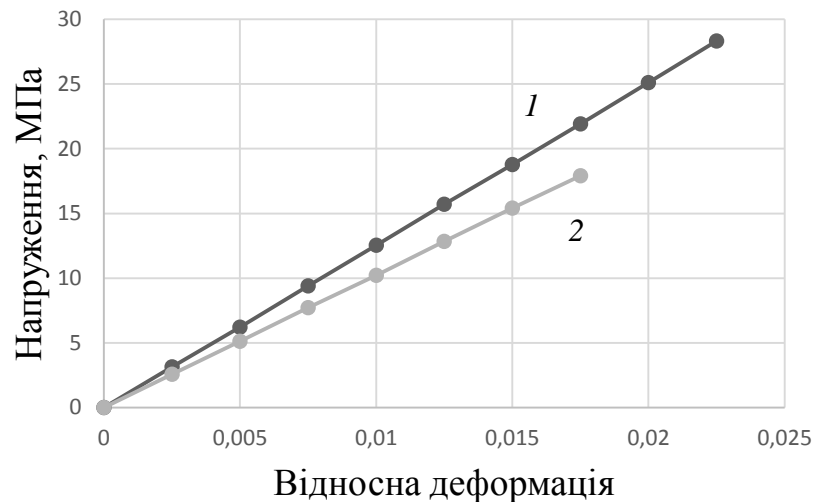


Рисунок 3.26 – Графік залежності напруження та відносної деформації при зсуві: 1 – суцільний матеріал, 2 – друкований зразок

Згідно графіка можливо встановити модуль Юнга для витратного матеріалу та при розтягу друкованих зразків перпендикулярно шару. Отримані значення наступні:

$$G_{витр} = 1,25 \text{ ГПа}; G_{друк} = 2,52 \text{ ГПа}$$

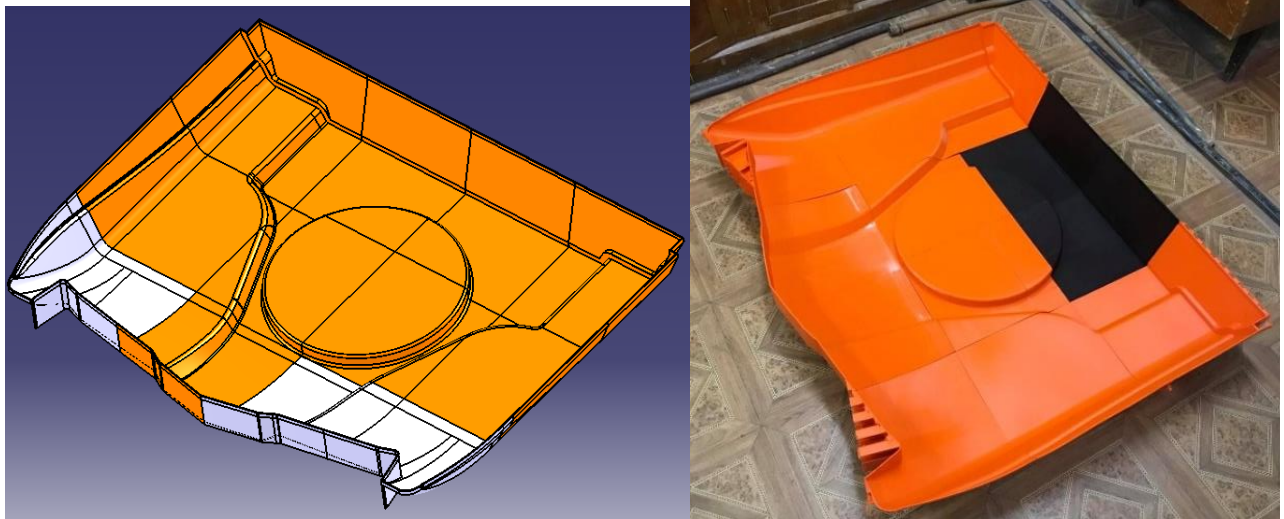
Так як: $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, коефіцієнт Пуассона наступний:

$$\nu_{витр} = 0,36, \nu_{друк} = 0,23$$

3.4.11 Дослідження динаміки охолодження

Під часу друку деталей, особливо тонкостінних, відбувається процес деформації форми внаслідок недостатньо швидкого охолодження полімерного матеріалу. Зазвичай виробники витратного матеріалу дають певні рекомендації стосовно налаштувань охолодження зони виходу матеріалу, проте вони не вказують вплив на точність виготовлення деталей.

Для встановлення впливу охолодження на точність друку, за основу взято фрагмент тонкостінної (товщина стінки $t_{стінки} = 2\text{мм}$) крупногабаритної форми для виготовлення матриці вакуумного формування для ТО “IceClime” (м. Чернівці) (рис. 3.27).



а)

б)



в)

г)

а) цифрова модель; б) готовий виріб; в) склопластикова форма на основі друкованої форми; г) готовий виріб

Рисунок 3.27 – Процес виготовлення композитної матриці на основі 3D друку для вакуумного формування (продовження)

Перший друк відбувався при відсутності охолодження ($\alpha = 0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$). Розподіл відхилень зображено на рис. 3.28. Видно, що деформовані зони присутні по всій поверхні деталі.

Статистику відхилень наведено в Таблиця 3.5

Таблиця 3.5 – Статистика відхилень при $\alpha = 0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

$N_{\text{заг.}}$	$N_{\text{відх.}}$	dev_{max}	$Dev_{\text{заг.}}$
шт.	шт.	мм	мм
7079	3546	3,47	1482

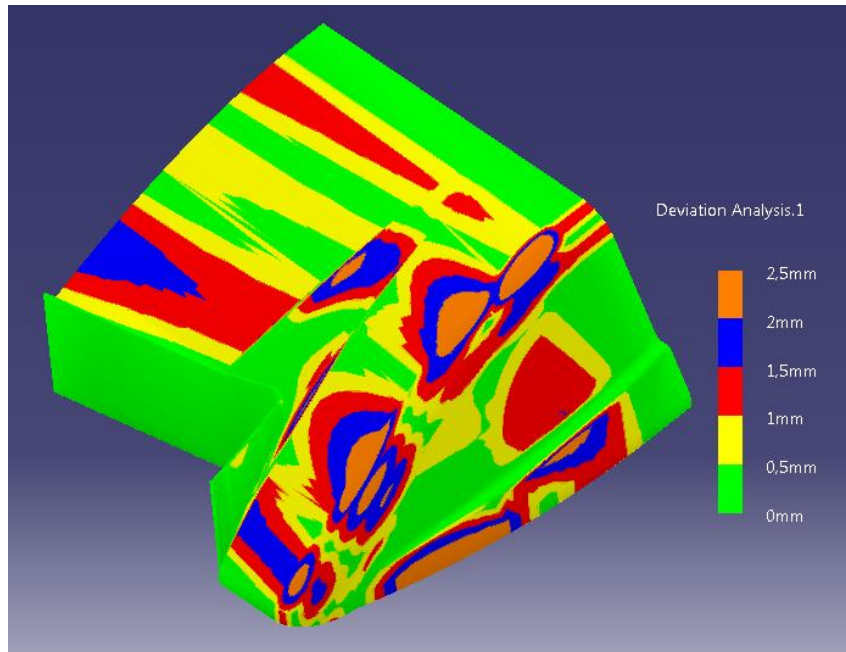


Рисунок 3.28 – Загальний вигляд карти відхилень при відсутності охолодження ($\alpha = 0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$)

Очевидно, що даний режим є недопустимим, майже половина поверхні деталі є деформованою, тому необхідно підвищити інтенсивність охолодження.

Для наступного друку інтенсивність підвищено до $\alpha = 25 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Розподіл відхилень зображено на рис. 3.29. Видно, що площа деформованих

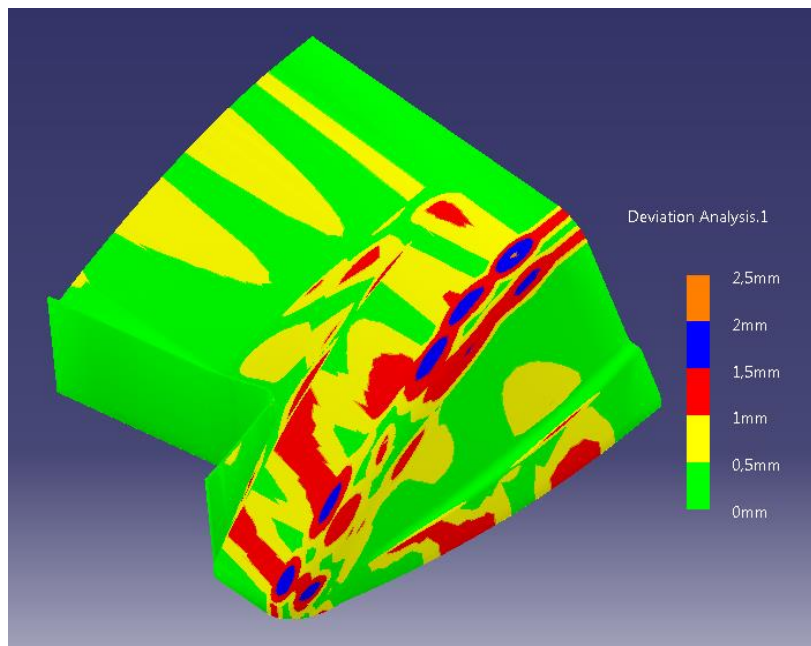


Рисунок 3.29 – Загальний вигляд карти відхилень при мінімальному охолодженні ($\alpha = 25 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$)

Статистику відхилень наведено в Таблиця 3.6

Таблиця 3.6 – Статистика відхилень при $\alpha = 25$ Вт/(м·К)

$N_{заг.}$	$N_{відх.}$	dev_{max}	$Dev_{заг.}$
шт.	шт.	мм	мм
7079	2125	2,03	815

В подальшому інтенсивність підвищено до $\alpha = 50$ Вт/(м·К). Розподіл відхилень зображено на рис. 3.30. Площа деформованих зон дещо зменшилась, на найбільшій передній поверхні практично відсутні деформації, проте на похилій поверхні велика кількість точок все ще вище критичного відхилення ($dev_{крит} = 0,5$ мм).

Статистику відхилень наведено в Таблиця 3.7

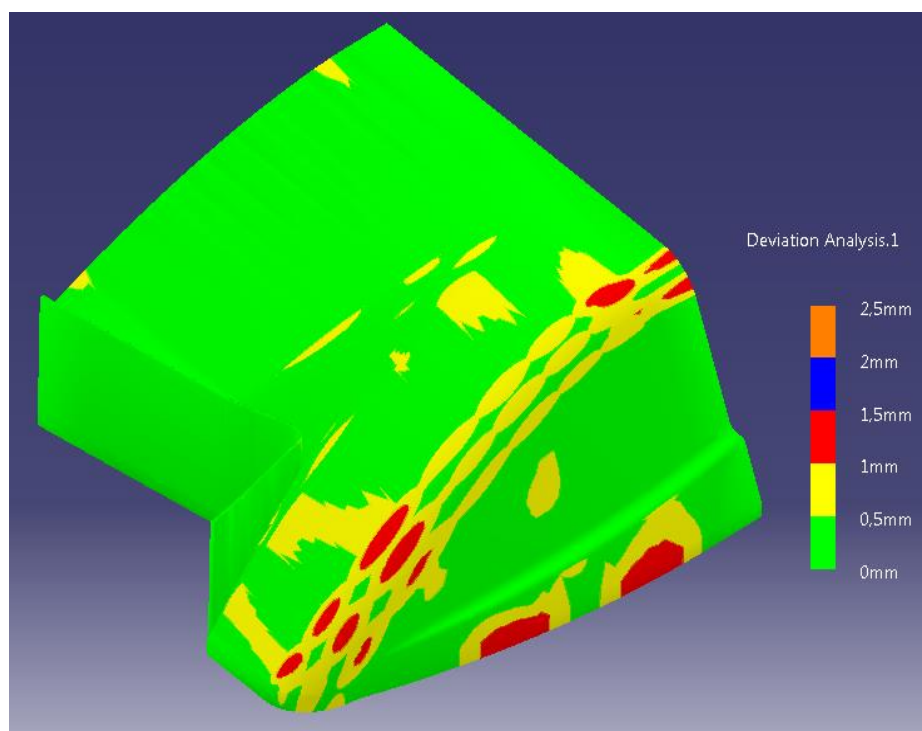


Рисунок 3.30 – Загальний вигляд карти відхилень при мінімальному охолодженні ($\alpha = 50$ Вт/(м·К))

Таблиця 3.7 – Статистика відхилень при $\alpha = 50$ Вт/(м·К)

$N_{заг.}$	$N_{відх.}$	dev_{max}	$Dev_{заг.}$
шт.	шт.	мм	мм
7079	843	1,37	351

В подальшому інтенсивність підвищено до $\alpha = 100 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Розподіл відхилень зображено на рис. 3.31. Площа деформованих зон дещо зменшилась, на найбільшій передній поверхні практично відсутні деформації, проте на похилій поверхні велика кількість точок все ще вище критичного відхилення ($dev_{крит} = 1\text{мм}$).

Статистику відхилень наведено в Таблиця 3.8

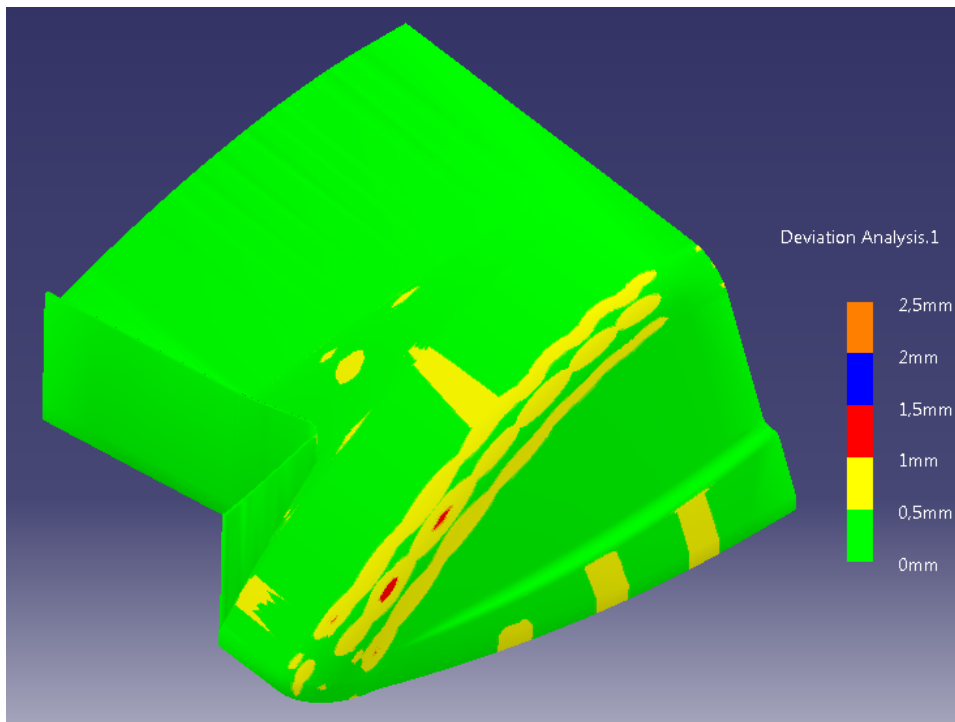


Рисунок 3.31 – Загальний вигляд карти відхилень при середньому охолодженні ($\alpha = 100 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$)

Таблиця 3.8 – Статистика відхилень при $\alpha = 100 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

$N_{заг.}$	$N_{відх.}$	dev_{max}	$Dev_{заг.}$
шт.	шт.	мм	мм
7079	103	0,76	62

В подальшому інтенсивність підвищено до $\alpha = 150 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Розподіл відхилень зображено на рис. 3.32. Деформовані зони практично зникли, на похилій поверхні все ще залишилась невелика кількість точок, що менші критичного відхилення ($dev_{крит} = 1\text{мм}$). Загалом даний режим охолодження дозволяє отримати максимально точні вироби.

Статистику відхилень наведено в Таблиця 3.9.

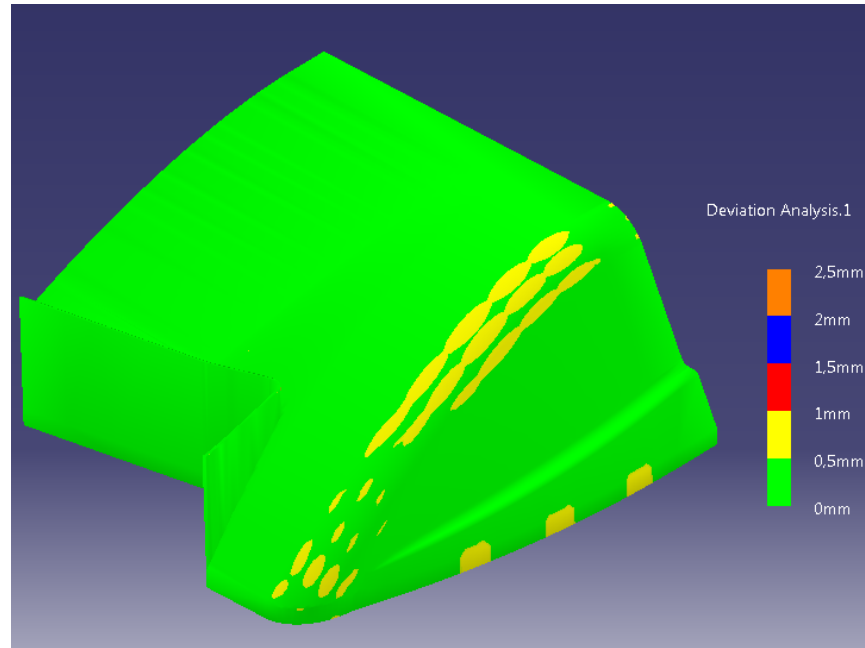


Рисунок 3.32 – Загальний вигляд карти відхилень при інтенсивному охолодженні ($\alpha = 150 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$)

Таблиця 3.9 – Статистика відхилень при $\alpha = 150 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

$N_{\text{заг.}}$	$N_{\text{відх.}}$	dev_{max}	$Dev_{\text{заг.}}$
шт.	шт.	мм	мм
7079	84	0,63	42

Конструкція друкувальної головки дозволяє подальше підвищення інтенсивності охолодження. Наступне значення становить $\alpha = 200 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Розподіл відхилень зображено на рис. 3.33. Виявилось, що площа деформованих зон почала зростати, в першу чергу на похилій поверхні, з'явилась певна кількість точок, що більші критичного відхилення ($dev_{\text{крит}} = 1 \text{ мм}$). Загалом даний режим охолодження дозволяє отримати приблизну точність, як і при інтенсивності охолодження $\alpha = 100 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Статистику відхилень наведено в Таблиця 3.10

Таблиця 3.10 – Статистика відхилень при $\alpha = 200 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

$N_{\text{заг.}}$	$N_{\text{відх.}}$	dev_{max}	$Dev_{\text{заг.}}$
шт.	шт.	мм	мм
7079	107	0,71	169

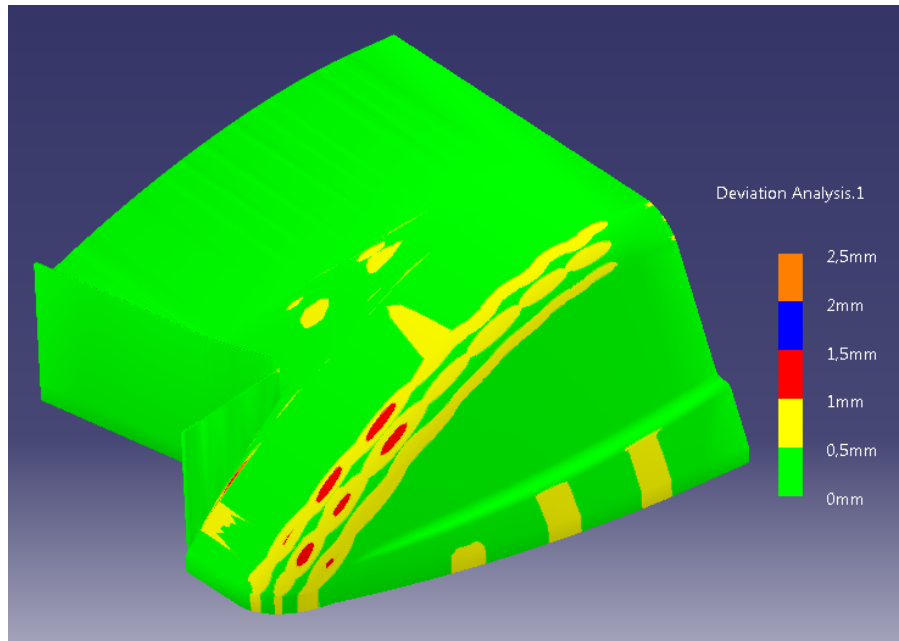


Рисунок 3.33 – Загальний вигляд карти відхилень при надінтенсивному охолодженні ($\alpha = 200 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$)

Подальше підвищення інтенсивності охолодження ($\alpha = 200 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) дало наступну карту розподілу відхилень зображену на рис. 3.34. Виявилось, що площа деформованих зон продовжила зростання, кількість точок, що більші критичного відхилення ($dev_{крит} = 1\text{мм}$), збільшилась майже вдвічі. Очевидно, що подальше підвищення інтенсивності охолодження є неприпустим для даного типу термопластичного полімерного матеріалу.

Статистику відхилень наведено в Таблиця 3.11

Таблиця 3.11 – Статистика відхилень при $\alpha = 250 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

$N_{заг.}$ шт.	$N_{відх.}$ шт.	dev_{max} мм	$Dev_{заг.}$ мм
7079	182	1,12	394

На рис. 3.35 показано результуючу залежність сумарного відхилення контрольних точок деталі в залежності від інтенсивності охолодження.

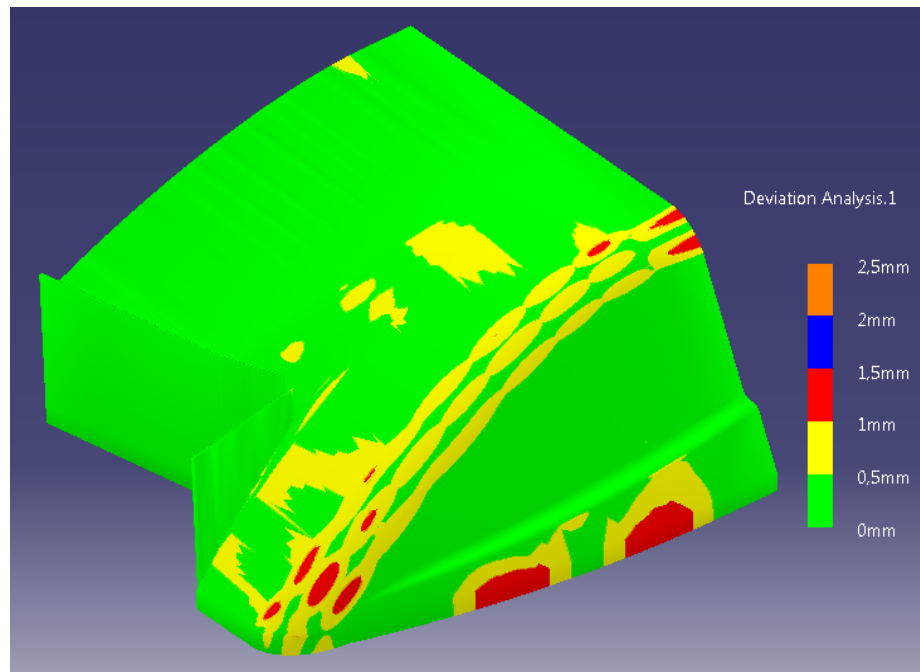


Рисунок 3.34 – Загальний вигляд карти відхилень при надінтенсивному охолодженні ($\alpha = 250 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$)

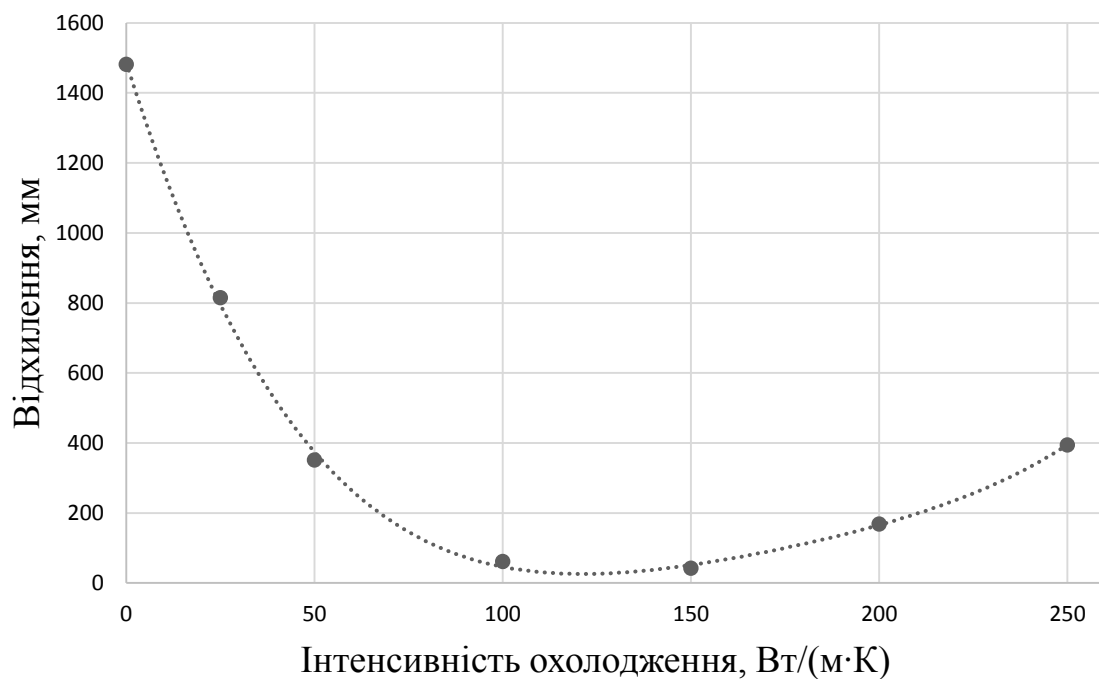


Рисунок 3.35 – Залежність відхилення форми від інтенсивності охолодження

Встановлено, що при повній відсутності охолодження точність виготовлення найгірша, зі збільшенням інтенсивності, якість поступово покращується, проте при надто інтенсивних режимах спостерігається знову наростання результуючого відхилення.

3.5 Висновки

В ході експериментальних досліджень було проведено ряд випробувань друкованих зразків, виготовлених при різних режимах 3D друку. Вивчено вплив основних технологічних параметрів на величину міжшарової адгезії та точність виготовлення виробів. Досліджено кінематичні характеристики руху друкувальної головки та продуктивність друку. Встановлено, що:

- для величини міжшарової адгезії існує діапазон температур друку при якому досягаються найвищі показники міцності ($t_{\text{друку}} = 210...220^{\circ}\text{C}$). При нижчих температурах адгезія двох шарів недостатня, при вищих – можлива деструкція та рекристалізація полімеру;
- в кожній групі присутня частина зразків (від 10 до 50%), для яких максимальне напруження на розтяг становить до 70% від показників міцності інших зразків групи, що спричинено появою дефектів внаслідок деформації під час охолодження полімерного матеріалу;
- при підвищенні швидкості руху екструдера відбувається стрімке зростання кількості дефектних зразків, внаслідок великої кількості деформацій при опливанні полімеру під час охолодження. Проте при низьких швидкостях також спостерігається послаблення зразків на 5-10% внаслідок локального перегріву застиглих шарів;
- виявлено, що товщина шару поступово зростає від менших до більших за діаметр сопла $d_{\text{сопла}} = 0,5\text{мм}$ значень, тому що при початку виходу полімеру з отвору каналу друкувальної головки присутня недоекструзія, що поступово змінюється розбуханням матеріалу;
- виявлено, що швидкість руху друкувальної головки в більшості випадків менша заданої, тому завжди розрахунковий час друку менший за фактичний, при чому зі зростанням швидкості друку ця різниця поступово спадає згідно степеневому закону;
- встановлено вплив величини інтенсивності охолодження на точність, що виражається у відхиленні контрольних точок виробу від базової цифрової моделі, виготовлення тонкостінної деталі методом 3D друку. Виявлено, що при

відсутності охолодження відбувається максимальна деформація форми деталі (до 30% контрольних точок відхилені більш, ніж 0,5 мм), внаслідок опливання полімеру, що поступово зменшується при підвищенні інтенсивності охолодження (до $\alpha = 150$ Вт/м·К), проте при подальшому збільшенні (до $\alpha = 250$ Вт/м·К) починається ріст загального відхилення форми (до 10% контрольних точок), що пов'язано з надмірною усадкою розплавленого полімеру.

Проведені дослідження дозволяють встановити якісні та кількісні дані щодо природи та величини міжшарової взаємодії та встановити взаємозалежність основних параметрів 3D друку, а саме температури та швидкості друку, товщини нанесеного шару розплавленого матеріалу на величину міжшарової взаємодії, а також інтенсивності обдуву на точність виготовлення деталей.

За результатами дослідження було опубліковано статті [83,84] та зроблено доповіді на науково-практичній конференції [85-88].

4 ВПРОВАДЖЕННЯ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

Під час роботи над дослідженнями в рамках дисертаційної роботи створено конструкції прототипів принципово нових друкувальних головок FDM 3D принтерів, а також відповідно до числового моделювання розширено підхід до налаштування технологічних параметрів процесу просторового друку, що дало змогу створити моделі для аеродинамічних досліджень для ТОВ “ТУКАНА ІНЖИНІРИНГ УКРАЇНА”, м. Київ.

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі під час проведення лекційних, практичних, лабораторних та факультативних занять, впроваджуються в рамках нових тем для курсових проектів і робіт з дисциплін «Проектування та дизайн», «Полімерне обладнання», а також під час виконання дипломного проектування на кафедрі хімічного, полімерного та силікатного машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського (акти впровадження результатів в додатку В).

4.1 Екструдер пристрою для тривимірного друку

Спроектвана [89] конструкція друкувальної головки (рис. 4.1) забезпечує збільшення швидкості плавлення полімерного матеріалу та можливість регулювання товщини нитки розплаву під час роботи. Дана задача вирішується тим, що в друкувальній головці пристрою для тривимірного друку в каналі для приймання прутка полімерного матеріалу встановлюється дорн.

Екструдер пристрою для тривимірного друку (рис. 4.1) містить механізм подачі 1 полімерного матеріалу 2, канал 3 для приймання прутка 2, нагрівальний блок 4 і сопло 5. В каналі 3 встановлено дорн 6. В найбільш прийнятному варіанті конструктивного виконання дорн 6 виконано з можливістю осьового переміщення відносно каналу 3 та зміни перерізу отвору сопла 5, а пруток полімерного матеріалу 2 виконано трубчастого перерізу.

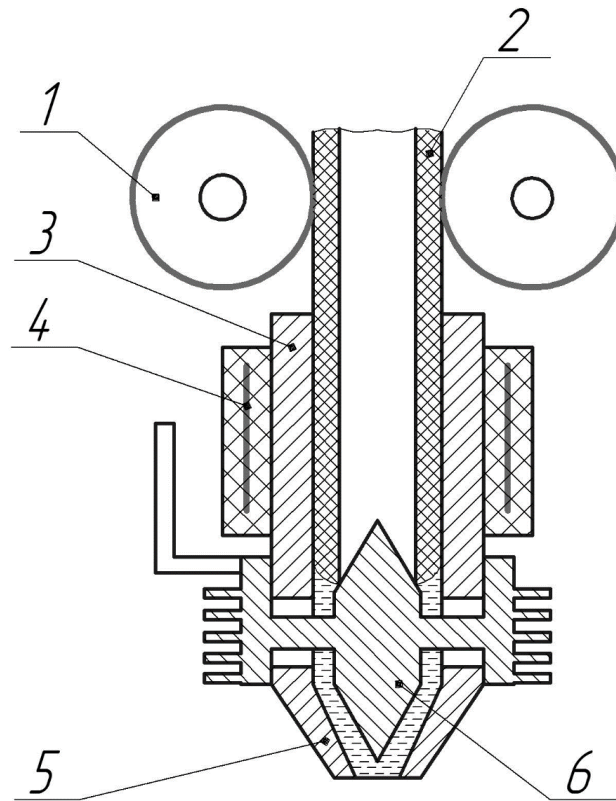


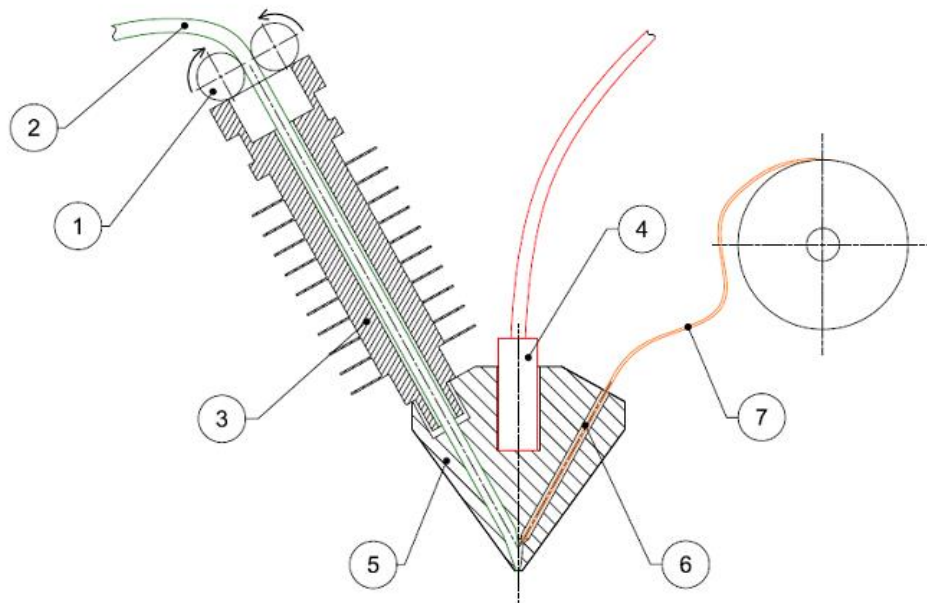
Рисунок 4.1 – Екструдер пристрою для тривимірного друку

Пруток 2 подається механізмом подачі 1 до каналу 3, де під дією тепла від нагрівального блоку 4 починає плавитись. Проходячи між нагрітими стінками каналу 3 та дорна 6, ефективність плавлення прутка полімерного матеріалу 2 зростає, що дає змогу підвищити швидкість його подачі. Завдяки можливості осьового переміщення дорна 6 відносно каналу 3 він може регулювати переріз отвору сопла 5 або перекривати його повністю, тим самим регулюючи товщину нитки розплаву та виконуючи функцію запираючого клапану. Таким чином досягається збільшення швидкості плавлення полімерного матеріалу та можливість регулювання товщини нитки розплаву під час роботи, що сприяє збільшенню швидкості та точності дії пристрою.

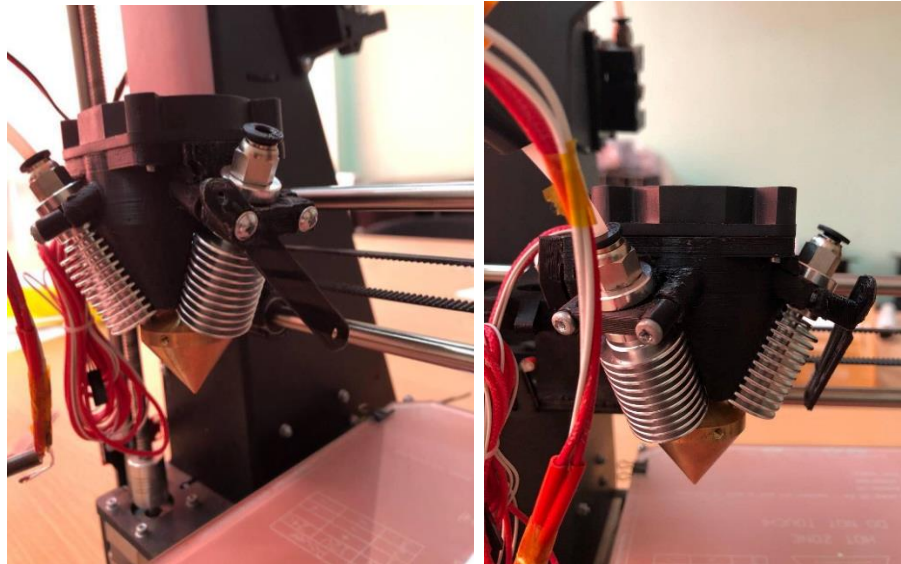
4.2 Екструдер пристрою для тривимірного друку армованих полімерних виробів

Розроблений [90] дизайн екструдера пристрою для тривимірного друку армованих полімерних виробів (рис. 4.2) дозволяє використовувати безперервні

волокнисті матеріали, що підвищують механічні властивості полімерних виробів. Поставлена задача вирішується тим, що в друкувальній головці пристрою для тривимірного друку армованих полімерних виробів екструдер містить додатковий канал подачі волокнистого матеріалу, що спряжений на виході із сопла з каналом для подачі полімерного матеріалу.



а)



б)

Рисунок 4.2 – Екструдер пристрою для тривимірного друку армованих полімерних виробів: а) принципова схема; б) готова конструкція

Екструдер пристрою для тривимірного друку армованих полімерних

виробів містить механізм подачі 1 прутка полімерного матеріалу 2, канал 3 для просування полімерного матеріалу 2, нагрівальний блок 4, сопло 5, додатковий канал 6 подачі волокнистого матеріалу 7, який може бути у вигляді моноволокна, ровінга, нитки і т. п.

Пруток 2 подається механізмом подачі 1 до каналу 3, де під дією тепла від нагрівального блоку 4 плавиться і надходить до сопла 5. Водночас волокнистий матеріал 7 подається до сопла 5 крізь додатковий канал 6, де з'єднується з розплавленим полімером і виходить разом з ним із сопла 5, утворюючи армований шар полімерного виробу. Таким чином, за рахунок використання такої конструкції екструдера пристрою для тривимірного друку армованих полімерних виробів досягається можливість створення полімерних виробів, наповнених безперервним волокнистим матеріалом, що сприяє підвищенню їх міцності та жорсткості.

4.3 Спосіб тривимірного друку полімерних матеріалів

Розроблений [91] дизайн екструдера пристрою для тривимірного друку полімерних виробів (рис. 4.3), який забезпечує можливість створення виробів шляхом пошарового нанесення рідкого компонента, який здатний тверднути, в порожнину, утворену термопластичним контурним шаром, що покращить механічні властивості одержуваних полімерних виробів. Поставлена задача вирішується тим, що в утворений контурний полімерний термопластичний шар, рідкий компонент подають крізь сопло з клапаном, яке попередньо з'єднують шлангом з ємністю для рідкого компонента та пристроєм його подачі.

На підложку 1 наносять контурний шар 2 заданої висоти та товщини з термопластичного матеріалу 3, який розплавляють і подають екструзійною головкою 4 за рахунок її пересування відносно підложки 1 по горизонтальних координатах X та Y.

У порожнину, утворену контурним шаром 2, з ємності 5 пристроєм подачі 6 крізь сопло 7 та відкритий клапан 8 подають рідкий компонент 9 до рівня, який

не перевищує висоту контурного шару 2. Після цього подачу рідкого компоненту припиняють, клапан 8 закривають та зсувають екструзійну головку 4 відносно підложки 1 у вертикальному напрямі Z на висоту наступного контурного шару 2. Перелічені дії повторюють до повного формування виробу заданої конфігурації.

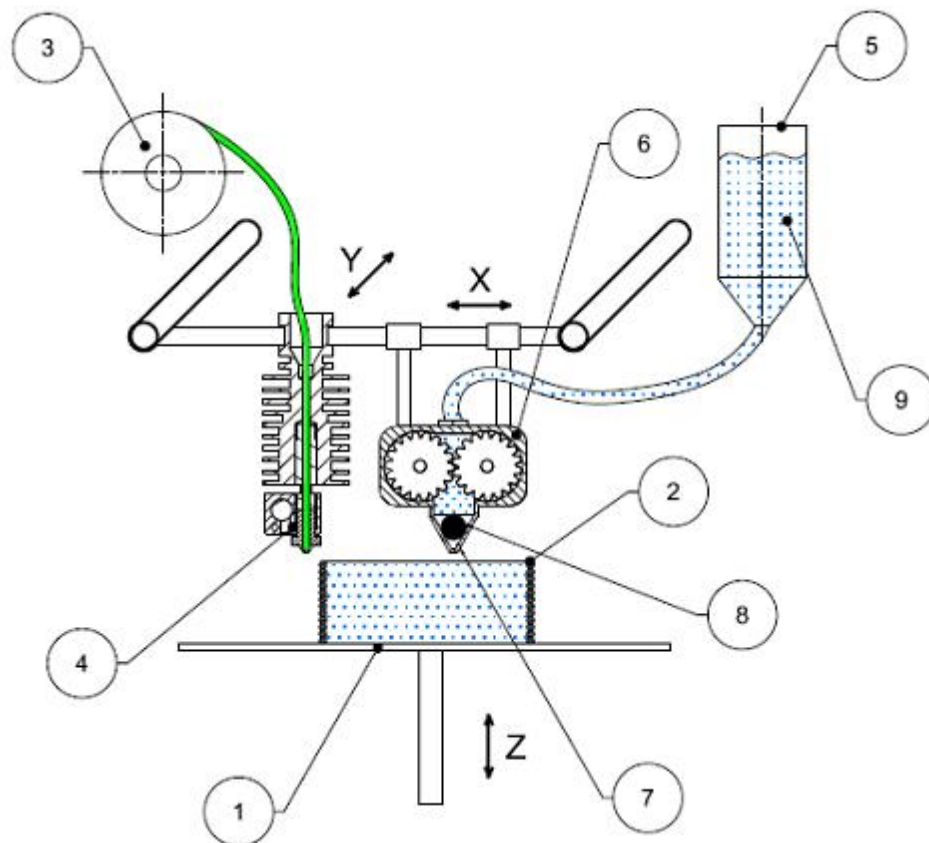


Рисунок 4.3 Екструдер пристрою для тривимірного друку

4.4 Впровадження результатів науково-технічних розробок

Було розроблено та впроваджено до використання на ТОВ “ТУКАНА ІНЖИНІРИНГ УКРАЇНА” науково-технічний продукт у вигляді методики автоматизованого проектування та 3D-моделей обладнання для виготовлення моделей для аеродинамічних випробувань, в якому застосовано сучасний підхід до проектування та моделювання з точності виготовлення методом просторового друку.

Створені тривимірні моделі конструкцій дозволяють більш точно обґрунтувати вибір їх геометричних і конструктивних параметрів та уникнути багатьох помилок під

час 3D-друку, що характерні при виготовленні традиційними методами.

Очікуваний економічний ефект від впровадження методики проектування з удосконалення технологічного процесу виготовлення аеродинамічних моделей методом 3D-друку на ТОВ «ТУКАНА ІНЖИНІРИНГ УКРАЇНА» складає 243 тисячі грн. на рік.

4.5 Висновки

Розроблено конструкції друкувальних головок обладнання для просторового друку, що дозволяють:

- збільшити на 55-65% контактну площу плавлення витратного матеріалу з використанням більш технологічно простого у виготовленні полімерного трубчастого дроту (філамент);
- створювати вироби, армовані неперевними волокнистими матеріалами;
- виготовляти вироби на основі рідких реактопластичних смол, що мають довгий час полімеризації (від 1 год).

На розроблені конструкції отримано патенти України на корисну модель [89-91] та зроблено доповідь на науково-практичній конференції [82].

Результати дисертаційної роботи впроваджено на:

- ТОВ «ТУКАНА ІНЖИНІРИНГ УКРАЇНА» (м. Київ) при проектуванні та виготовленні моделей для аеродинамічного випробовування.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що дослідження процесу формування виробів методом просторового друку є погано вивченим, існуючі дослідження вивчають лише вплив окремих параметрів 3D друку на механічні властивості виробів, не мають комплексний характер та не визначають взаємний вплив основних технологічних режимів на процес.

2. Вдосконалено та проведено комплексні експериментальні дослідження, що дозволяють отримати дані про величину та природу взаємодії шарів термопластичного полімерного матеріалу та встановити залежність величини міжшарової адгезії від основних режимних параметрів процесу 3D друку.

3. Проведено дослідження динаміки руху друкувальної головки різних механічних схем FDM 3D принтера та встановлено залежність продуктивності устаткування від швидкості переміщення виконавчих органів.

4. Проведено дослідження впливу технологічних параметрів процесу 3D друку, в першу чергу інтенсивності охолодження, на точність виготовлення тонкостінних крупногабаритних виробів, розроблено метод кількісної оцінки відхилення форми друкованого об'єкту від теоретичної 3D моделі.

5. Математичну модель процесу 3D друку полімерними термопластичними матеріалами доповнено рівняннями, що дозволяють враховувати міжшарову взаємодію та інтенсивність охолодження нанесеного розплавленого матеріалу.

6. Проведене числове моделювання процесу охолодження нанесеного термопластичного полімерного матеріалу в залежності від товщини шару встановило динаміку зміни форми поперечного перерізу шару у часі в залежності від інтенсивності, що дало змогу встановити розмір контакту між шарами та підібрати оптимальні режими друку для збереження високої точності виготовлення.

7. Проведене числове моделювання розшарування друкованих виробів під час навантаження на статичний розтяг поперек напрямку нанесення шарів показало величину та природу навантажень на розтяг, запропонована методика числового моделювання дозволяє визначити величину міжшарової взаємодії та прогнозувати місце появи розшарування.

8. Розроблено конструкцію друкувальної головки, що дозволяє підвищити інтенсивність плавлення витратного термопластичного полімерного матеріалу та регулювати діаметр нитки вихідного розплаву. Дана конструкція дозволяє використовувати полімерну стренгу (філамент) трубчатого перерізу, що більш простий у виготовленні. На розроблену конструкцію отримано патент України на корисну модель.

9. Розроблено конструкцію друкувальної головки, що дозволяє армувати вироби безперервним волокнистим матеріалом, підвищити механічні характеристики та усунути анізотропність властивостей друкованих виробів. На розроблену конструкцію отримано патент України на корисну модель

10. Розроблено конструкцію друкувальної головки, що дозволяє використовувати рідкі реактопластичні смоли та композиції на їх основі. Дана конструкція дозволяє отримувати ізотропні вироби з широким спектром механічних та хімічних властивостей на основі класичного FDM 3D принтера. На розроблену конструкцію отримано патент України на корисну модель

11. Результати дисертаційної роботи впроваджено на ТОВ «ТУКАНА ІНЖИНІРИНГ УКРАЇНА» (м. Київ) при проектуванні та виготовленні аеродинамічних моделей та у навчальний процес кафедри ХПСМ ІХФ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Wohlers Report 2012. Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report ISBN 0-9754429-8-8.
2. Токарев Б.Е., Токарев Р.Б. Анализ рынка 3D-печати: технологии и игроки // Практический маркетинг. № 2. 2014.
3. Wohlers Report 2014. 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report ISBN 978-0-9913332-0-2.
4. Басов Н. И. Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов : учеб. для вузов / Н. И. Басов, Ю. В. Казанков, В. А. Любартович. — М. : Химия, 1986. — 488 с.
5. Торнер Р. В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов) / Р. В. Торнер. — М. : Химия, 1977. — 464 с.
6. ISO / ASTM52900-15, Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org
7. The Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing. Formlabs, Inc. Retrieved 26 December 2017.
8. US Patent for Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography Patent (Patent # 4,575,330 issued March 11, 1986)
9. Vithani, K., Goyanes, A., Jannin, V. et al. An Overview of 3D Printing Technologies for Soft Materials and Potential Opportunities for Lipid-based Drug Delivery Systems. Pharm Res 36, 4 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11095-018-2531-1>
10. Miyajima, Hadi, "Binder jetting additive manufacturing process fundamentals and the resultant influences on part quality." (2018). Electronic Theses and Dissertations. Paper 3058. <https://doi.org/10.18297/etd/3058>
11. P. Chennakesava, Y. Shivraj Narayan. Fused Deposition Modeling – Insights. ICAD&M'14. P.1345-1350. (2018)
12. <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/powder-bed-fusion>

13. Saad A. Khairallah, Andrew T. Anderson, Alexander Rubenchik, Wayne E. King. Corrigendum to “Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones” .Acta Mater. 108 (2016) p. 36–45.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.02.014/>
14. http://home.iitk.ac.in/~nsinha/Additive_Manufacturing%20II.pdf
15. <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/>
16. Chua, Chee Kai; Leong, Kah Fai; Lim, Chu Sing (2003). Rapid Prototyping: Principles and Applications. Singapore: World Scientific. p. 124. ISBN 9789812381170
17. "FDM(Fused Deposition Modeling)". rpworld.net. Archived from the original on August 12, 2013. Retrieved December 27, 2017.
18. "What's up with Original Prusa i3? – Prusa Printers". Prusa Printers. March 2, 2016. Retrieved June 13, 2016.
19. <https://www.prusa3d.com/>
20. <https://www.makerbot.com/>
21. <https://ultimaker.com/>
22. Weikert, S., Ratnaweera, R., Zirn, O., Wegener, K. Modeling and measurement of H-Bot kinematic systems / Swiss Federal Institute of Technology, ETH, Zurich, 2010.
23. <http://www.pp3dp.com/>
24. <https://www.cosineadditive.com/>
25. <https://www.fabbaloo.com/blog/2014/7/2/the-tekma3d-tm1-3d-printer>
26. <https://all3dp.com/2/what-is-a-delta-3d-printer-simply-explained/>
27. <https://polar3d.com/>
28. <https://www.dobot.cc/dobot-m1/product-overview.html>
29. <https://u3df.com.ua/>
30. <https://monofilament.com.ua/>
31. <https://3dplast.biz/>

32. <https://shop.plexiwire.com.ua/>
33. Пат. AU № 2015203875A1, МПК B29C 31/04, B29C 67/00 / Extruder heads for three dimensional printers. D. Popovski, опубли. 28.01.2016
34. Пат. US № US2016279853A1, МПК B29C 47/1018, B29C 67/0074. Detachable filament guide and nozzle module for 3D printers. A. Bracha, E. Galor/ Опубли. 29.09.2016
35. Пат. US 2015/0140158 A1, МПК B29C 67/0085, B29C 67/0051. Three dsmensional printing systems. S. Cervantes, X. Lou, Y. Kim. Опубли. 21.05.2015
36. Пат. US № 9579851 B2, МПК B29C67/0074, B29C70/20/ Apparatus for fiber reinforced additive manufacturing, G. Mark, A. Gozdz, опубли. 28.02.2017
37. Пат. CN 106493939, МПК B29C 64/122, опубли. 22.12.2016
38. Divyathej M., Varun M., Rajeev P. Analysis of mechanical behavior of 3D printed ABS parts by experiments/International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 7, Issue 3, p.116-124, March-2016.
39. Todd Letcher, Megan Waytashek. Material property testing of 3D-printed specimen in PLA on an entry-level 3D printer. Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2014 November 14-20, 2014, Montreal, Quebec, Canada.
40. Evaluation of Infill Effect on Mechanical Properties of Consumer 3D Printing Materials. Gabriel A. Johnson, Jesse J. French. Advances in Technology Innovation, vol. 3, no. 4, 2018, pp. 179 – 184.
41. M. Ouhsti, B. El Haddadi, S. Belhouideg. Effect of Printing Parameters on the Mechanical Properties of Parts Fabricated with Open-Source 3D Printers in PLA by Fused Deposition Modeling. Mechanics and Mechanical Engineering. Technical University of Lodz. Vol. 22, No. 4 (2018) p. 895-907.
42. Daniel Farbman, Dr. Chris McCoy, Materials testing of 3D printed ABS and PLA samples to guide mechanical design. Proceedings of the ASME 2016 International Manufacturing Science and Engineering Conference MSEC2016 June 27-July 1, 2016, Blacksburg, Virginia, USA.

43. R. Singh, R. Kumar. Mechanical and Experimental Study on the use of Sustainable Materials for Additive Manufacturing. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, p. 473 (2019). doi:10.1088/1757-899X/473/1/012010.
44. V. Kuznetsov, A. Solonin, O. Urzhumtsev. Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process. *Polymers* 2018, 10, 313; doi:10.3390/polym10030313.
45. Олексишен В. О. Аналіз конструктивних особливостей та ефективності застосування сучасних FDM принтерів для просторового друку полімерних термопластичних матеріалів / В. О. Олексишен // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2020.
46. Thermal analysis of fused deposition / [M. A. Yardimci, T. Hattori, S. I. Gucerı and other]// *Solid Freeform Fabrication Proceedings*. – 1997.
47. Bellini A. Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling / A. Bellini, S. Gucerı. // *Rapid Prototyping Journal*. – 2003. – С. pp. 252–264.
48. Processproperty-performance relationship for fused deposition of ceramics (FDC) feedstock materials / [N. Venkataraman, S. Rangarajan, B. Harper and other]. // *Solid Freeform and Additive Fabrication, San Francisco*. – 2000. – С. pp. 203–210.
49. Michaeli W. Extrusion Dies for Plastics and Rubber: Design and Engineering Computations / W. Michaeli. // *Hanser Verlag*. – 2003.
50. Crockett R. S. The liquid-to-solid transition in stereodeposition techniques / R. S. Crockett, P. D. Calvert. // *Solid Freeform Fabrication Proceedings*. – 1996. – С. pp. 257–264.
51. Crockett R. S. The liquid-to-solid transition in stereodeposition techniques : PhD / Crockett R. S. – Arizona, 1997.
52. Middleman S. Modeling Axisymmetric Flows Dynamics of Films, Jets, and Drops, / S. Middleman. – San Diego, CA: Academic Press, 1995. – (Academic Press).

53. Thomas J. P. Solid freeform Fabrication Proceedings / J. P. Thomas, J. F. Rodriguez. // University of Texas at Austin, Austin, TX,. – 2000. – C. pp. 16–23.

54. Sakharov A. S., Kozak A. L., Gondliakh A. V., Melnikov. S. L. Mathematical model of the deformation of multilayer composite shell systems. Strength of Materials and Theory of Structures. 1984. № 44. P.13–16.

55. Gondliakh A.V. Refined model of multilayer structures deformation for progressive destruction processes study. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2012. №7 (56). vol. 2. P. 52-57.

56. Gondliakh A.V. Adaptation in ABAQUS of the iterated-analytical multilayer user finite element. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2012. № 7 (57). vol. 3. P. 62-68.

57. Sakharov A.S., Gondlyakh A.V., Strizhalo A.V. On features of numerical integration for the equations of motion of laminated shell systems in the iterative analytic theory. International Applied Mechanics. 1997. № 33 (9). P. 713-718.

58. Gondlyakh A., Chemeris A., Kolosov A., Sokolskiy A., Antonyuk S. Simulation of Delamination Processes of Multilayer Mechanical Engineering Structures. Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. P. 129–138. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_13

59. Malinin N.N. Creep theories in metal forming. Plasticity and failure behavior of solids. Springer, Dordrecht : Fatigue and Fracture. 1990. vol. 3. P. 31-59.

60. Gondliakh O., Onopriienko V., Chemerys A., Numerical analysis of jerry can strength under static and dynamic loads. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015. Vol. 3. Issue 7. P. 23-29. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.44383 23-29.

61. Gondliakh O., Krytskyi V., Onopriienko V., Chemerys A., Krytska N. Computer analysis of thermomechanical state of sealing steel lining for containment of NPPs with VVER-1000/V-320 in emergencies. Nuclear and Radiation Safety. 2017. Vol. 4. Issue 76. P. 28-39. EID: 2-s2.0-85045401219.

62. Gondliakh O., Onoprienko V., Nikitin R.: Numerical Simulation of crack propagation in bimetallic spatial structures. Technology audit and production reserves. 2014. №1 (17). vol. 3. P. 23-27.
63. Броек Д. Основы механики разрушения. Пер. с англ. Москва : Высшая школа. 1980. 368 с.
64. Чемерис А. О. Надійність і довговічність машин та апаратів хімічних виробництв з урахуванням еволюції їх руйнування : дис... кандидата техн. наук : 05.05.13. Київ, 2018. 191 с.
65. Aminpour, M. A., Hosapple, K. A., "Finite Element Solutions for Propagating Interface Crack with Singularity Elements," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 39, No. 3, 1991, pp. 451–468.
66. Jinping, Z., and Huizu, A., "Stress Analysis Around Holes in Orthotropic Plates by Subregion Mixed Finite Element Method," Computers and Structures, Vol. 41, No. 1, 1991, pp. 105–108.
67. Farhat, C., and Roux, F. X., "A Method of Finite Element Tearing and Interconnecting and Its Parallel Solution Algorithm," International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 32, 1991, pp. 1205–1227.
68. Farhat, C., and Gerardin, M., "Using a Reduced Number of Lagrange Multipliers for Assembling Parallel Incomplete Field Finite Element Approximations," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 97, 1992, pp. 333–354.
69. Maday, Y., Mavriplis, C., and Patera, A., "Non-Conforming Mortar Element Methods: Application to Spectral Discretizations," NASA CR-181729, ICASE Rept. 88-59, 1988.
70. Ransom, J. B., McCleary, S. L., and Aminpour, M. A., "A New Interface Element for Connecting Independently Modeled Substructures," AIAA Paper 93-1503, 1993.
71. Housner, J. M., Aminpour, M. A., D'Avila, C. G., Schiermeier, J. E., Stroud, W. F., Ransom, J. B., and Gillian, R. E., "An Interface Element for Global/Local and Substructuring Analysis," MSC 1995 World Users' Conf. Proceedings, Paper 25, MSC Software Corp., Santa Cruz, CA, May 1995.

72. Aminpour, M. A., Ransom, J. B., and McCleary, S. L., “A Coupled Analysis Method for Structures with Independently Modeled Finite Element Subdomains,” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 38, 1995, pp. 3695–3718.

73. Ransom, J. B., “Interface Technology for Geometrically Nonlinear Analysis of Multiple Connected Subdomains,” *AIAA Paper 97-1298*, 1997.

74. Aminpour, M. A., and Krishnamurthy, T., “A Two-Dimensional Interface Element for Multi-Domain Analysis of Independently Modeled Three-Dimensional Finite Element Meshes,” *AIAA Paper 97-1297*, 1997.

75. Aminpour, M. A., Krishnamurthy, T., and Fadale, T. D., “Coupling of Independently Modeled Three-Dimensional Finite Element Meshes with Arbitrary Shape Interface Boundaries,” *AIAA Paper 98-2060*, 1998.

76. Aminpour, M. A., Pageau, S., and Shin, Y., “An Alternative Method for the Interface Modeling Technology,” *AIAA Paper 2000-1352*, 2000.

77. Pantano, A., Averill, C.R.,” *Finite Element Interface Technology for Modeling Delamination Growth in Composite Structures*”, *AIAA*, Vol. 42, No. 6, June 2004.

78. Cho, M., and Kim, W. B., “A Coupled Finite Element Analysis of Independently Modeled Substructures by Penalty Frame Method,” *AIAA Paper 98-2061*, 1998.

79. Метод испытания на растяжение пластмасс, ГОСТ 11262-80

80. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, *ASTM Standard D628-14*

81. Босый В. В. Инженерные методы расчета погрешностей при выполнении лабораторных работ по курсам «Тепломассообмен» и «Техническая термодинамика» / В. В. Босый, Г. Н. Васильченко, Е. Н. Панов. — Киев, 1985. — 72 с.

82. Vito Borrelli. Kinematic and dynamic analysis of a machine for additive manufacturing/ *Master Thesis/ POLITECNICO DI TORINO*, 2018.

83. Oleksyshen V.O., Sokolskyi A.L., Kolosov A.E., Solovei V.V. The impact of 3D printing parameters on physical and mechanical properties of thermoplastic products. *Modern engineering and innovative technologies*. Karlsruhe, Germany. Is. No.11, Part 1, pp. 9-16. Publ. March 2020

84. Oleksyshen V.O., Sokolskyi A.L., Kolosov A.E., Solovei V.V. Determination of geometric and kinematic characteristics of FDM 3D print process. *Technology audit and production reserves*. 2020. No. 2/1 (52). Pp. 19-21.

85. Олексисен В. О., Сокольський О. Л., Колосов О. Є. Моделювання процесу охолодження шарів полімеру у виробках, які виробляються методом 3D-друку. Збірник доповідей XI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки». м. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 4–5 червня 2020 р.. С. 81–85.

86. Олексисен В. О., Сокольський О. Л., Колосов О. Є. Аспекти моделювання процесів приготування термопластичних полімерних виробів методом просторового друку. Збірник наукових праць VI Міжнародної науково-технічної конференції з проблем вищої освіти і науки ТК-2020 «Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів». м. Луцьк, 2-4 червня 2020 р. С. 175-177.

87. Олексисен В. О., Сокольський О. Л., Колосов О. Є. Проблемні питання застосування сучасних FDM принтерів для просторового друку полімерних термопластичних матеріалів. Збірник доповідей IX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн, об'єкти інтелектуальної власності та інноваційна діяльність студентів та молодих вчених», 29 квітня 2020 р. м. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – С. 35-38.

88. Oleksyshen V.O., Sokolskyi A.L., Kolosov A.E. Some aspects of the additive production of thermoplastic products. Тез. доп. IV-ї міжнародної конференції «Прикладні науково-технічні дослідження». м. Івано-Франківськ, 01-03.04.2020. – С. 83-84.

89. Пат. № 117196 U (UA) МПК (2006/01) B29C 47/58 u 2016 11462, 14.11.2016 Бюл. № 12/2017, 26.06.2017.

90. Пат. № 127343 U (UA) МПК (2006/01) B29C 31/04 u 2018 02156, 02.03.2018 Бюл. № 14/2018, 25.07.2018.

91. Пат. № 131263 U (UA) МПК (2006.01) B29C 47/00 u 2018 07435, 03.07.2018 Бюл. № 1/2019, 10.01.2019.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗРАЗКІВ НА МІЦНІСТЬ

Умовні позначення, що застосовуються у таблицях:

d_f – діаметр витратного матеріалу, мм;

a – ширина зразка, мм;

b – товщина зразка, мм;

$\Delta_{шару}$ – товщина шару нанесеного матеріалу, мм;

$t_{друку}$ – температура виходу матеріалу з друкувальної головки, °С;

$V_{друку}$ – швидкість переміщення друкувальної головки, мм/с;

P – навантаження на розтяг, Н;

σ_{max} – напруження при розтягу, МПа.

А.1. Дослідження витратного матеріалу (філаменту)

Таблиця А.1 – Результати випробовувань філаменту на розтяг.

№	d_f , мм	P , Н	σ_{max} , МПа
1	1,75	13,62	53,13535
2		13,23	51,61385
3		13,33	52,00398
4		13	50,71656
5		13,78	53,75955

А.2. Дослідження зразків, друкованих за різних температур

Таблиця А.2 – Результати випробовувань друкованих зразків на розтяг.

Температура друку від 190°С до 250°С.

№	a , мм	b , мм	$\Delta_{шару}$, мм	$t_{друку}$, °С	$V_{друку}$, мм/с	P , Н	σ_{max} , МПа
1	1	5	0,2	190	30	123,54	24,708
2						153,43	30,686
3						159,21	31,842
4						53	10,6
5						159,59	31,918

Продовження таблиці А.2

№	a , мм	b , мм	$\Delta_{шару}$, мм	$t_{друку}$, °С	$V_{друку}$, мм/с	P , Н	σ_{max} , МПа					
6	1	5	0,2	190	30	23,44	4,688					
7						54,76	10,952					
8						121,44	24,288					
9						149,93	29,986					
10						153,91	30,782					
11						132,92	26,584					
12						145,48	29,096					
13						155,6	31,12					
14						45,52	9,104					
15						138,73	27,746					
16						135	27					
17						144,46	28,892					
18						78,34	15,668					
19						93	18,6					
20						149,37	29,874					
1						1	5	0,2	200	30	91,32	18,264
2											163,67	32,734
3											157,55	31,51
4											158,1	31,62
5											90,36	18,072
6	102,12	20,424										
7	112,37	22,474										
8	149,39	29,878										
9	104,54	20,908										
10	151,38	30,276										
11	164,12	32,824										
12	72,7	14,54										
13	53,35	10,67										
14	157,91	31,582										
15	155,78	31,156										
16	142,38	28,476										
17	62,38	12,476										
18	164,77	32,954										
19	152,39	30,478										
20	153,81	30,762										
1	1	5	0,2	210	30	155,3	31,06					
2						169,35	33,87					
3						168,21	33,642					
4						171,21	34,242					
5						119,48	23,896					

Продовження таблиці А.2

№	a , мм	b , мм	$\Delta_{\text{шару}}$, мм	$t_{\text{друку}}$, °С	$V_{\text{друку}}$, мм/с	P , Н	σ_{max} , МПа					
6	1	5	0,2	210	30	145,4	29,08					
7						85,83	17,166					
8						121,37	24,274					
9						157,95	31,59					
10						155,34	31,068					
11						167,12	33,424					
12						175,77	35,154					
13						68,53	13,706					
14						173,22	34,644					
15						55,21	11,042					
16						156,34	31,268					
17						102,38	20,476					
18						161,82	32,364					
19						165,45	33,09					
20						167,38	33,476					
1						1	5	0,2	220	30	88,35	17,67
2											188,94	37,788
3											175,44	35,088
4											179,36	35,872
5											171,45	34,29
6	165,35	33,07										
7	126,78	25,356										
8	198,12	39,624										
9	187,68	37,536										
10	180,16	36,032										
11	154,38	30,876										
12	184,25	36,85										
13	166,64	33,328										
14	167,44	33,488										
15	175,27	35,054										
16	189,28	37,856										
17	131,74	26,348										
18	121,13	24,226										
19	165,48	33,096										
20	173,28	34,656										
1	1	5	0,2	230	30	73,41	14,682					
2						83,96	16,792					
3						162,44	32,488					
4						161,61	32,322					
5						160,38	32,076					

Продовження таблиці А.2

№	a , мм	b , мм	$\Delta_{шару}$, мм	$t_{друку}$, °С	$V_{друку}$, мм/с	P , Н	σ_{max} , МПа
6	1	5	0,2	230	30	165,41	33,082
7						166,77	33,354
8						154,13	30,826
9						158,75	31,75
10						80,54	16,108
11						154,38	30,876
12						168,35	33,67
13						156,61	31,322
14						161,45	32,29
15						45,27	9,054
16						164,82	32,964
17						158,74	31,748
18						161,12	32,224
19						159,81	31,962
20	71,37	14,274					
1	1	5	0,2	240	30	143,75	28,75
2						137,18	27,436
3						151,89	30,378
4						140,65	28,13
5						56,3	11,26
6						139,19	27,838
7						134,85	26,97
8						135,65	27,13
9						141,35	28,27
10						21,8	4,36
11						105,6	21,12
12						135,71	27,142
13						134,85	26,97
14						73,28	14,656
15	141,33	28,266					
16	145,36	29,072					
17	38,71	7,742					
18	11,2	2,24					
19	140,28	28,056					
20	143,17	28,634					
1	1	5	0,2	250	30	113,51	22,702
2						34,75	6,95
3						112,74	22,548
4						114,48	22,896
5						61,28	12,256

Продовження таблиці А.2

№	a , мм	b , мм	$\Delta_{шару}$, мм	$t_{друку}$, °С	$V_{друку}$, мм/с	P , Н	σ_{max} , МПа
6	1	5	0,2	230	30	109,54	21,908
7						104,17	20,834
8						51,64	10,328
9						112,54	22,508
10						21,8	4,36
11						41,2	8,24
12						47,27	9,454
13						108,54	21,708
14						113,81	22,762
15						112,21	22,442
16						112,55	22,51
17						38,71	7,742
18						11,2	2,24
19						110,81	22,162
20	108,72	21,744					

А.3. Дослідження друкованих зразків з різною площею поперечного перерізу

Таблиця А.3 – Результати випробовувань друкованих зразків на розтяг.
Площа перерізу від 5 до 20 мм² (дані для 5 мм² в Табл. А.2)

№	a , мм	b , мм	$\Delta_{шару}$, мм	$t_{друку}$, °С	$V_{друку}$, мм/с	P , Н	σ_{max} , МПа
1	1	10	0,2	220	30	350,31	35,031
2						343,21	34,321
3						347,72	34,772
4						351,56	35,156
5						312,43	31,243
6						330,57	33,057
7						112,92	11,292
8						341,53	34,153
9						372,64	37,264
10						357,68	35,768
11						117,58	11,758
12						143,23	14,323
13						345,64	34,564
14						344,33	34,433

Продовження таблиці А.3

№	a , мм	b , мм	$\Delta_{шару}$, мм	$t_{дружу}$, °С	$V_{дружу}$, мм/с	P , Н	σ_{max} , МПа
15	1	10	0,2	220	30	366,72	36,672
16						355,16	35,516
17						348,62	34,862
18						117,93	11,793
19						339,27	33,927
20						340,55	34,055
1	1,5	10	0,2	220	30	540,11	36,00733
2						545,25	36,35
3						548,73	36,582
4						533,01	35,534
5						540,15	36,01
6						578,53	38,56867
7						599,92	39,99467
8						301,24	20,08267
9						544,21	36,28067
10						563,57	37,57133
11						565,65	37,71
12						542,48	36,16533
13						332,57	22,17133
14						551,32	36,75467
15						554,74	36,98267
16						539,78	35,98533
17						528,85	35,25667
18						554,69	36,97933
19						531,28	35,41867
20						540,31	36,02067
1	2	10	0,2	220	30	706,34	35,317
2						496,72	24,836
3						720,84	36,042
4						729,35	36,4675
5						722,52	36,126
6						700,54	35,027
7						688,92	34,446
8						733,27	36,6635
9						729,86	36,493
10						700,29	35,0145
11						703,72	35,186
12						740,29	37,0145
13						729,47	36,4735
14						707,66	35,383

Продовження таблиці А.3

№	a , мм	b , мм	$\Delta_{шару}$, мм	$t_{друку}$, °С	$V_{друку}$, мм/с	P , Н	σ_{max} , МПа
15	2	10	0,2	220	30	713,92	35,696
16						698,51	34,9255
17						690,74	34,537
18						554,64	27,732
19						701,97	35,0985
20						707,68	35,384

А.4. Дослідження друкованих зразків з різною товщиною наплавленого шару

Таблиця А.4 – Результати випробовувань друкованих зразків на розтяг з різною товщиною шару від 0,1 до 0,4 мм.

№	a , мм	b , мм	$\Delta_{шару}$, мм	$t_{друку}$, °С	$V_{друку}$, мм/с	P , Н	σ_{max} , МПа
1	2	10	0,1	220	30	700,29	35,0145
2						703,72	35,186
3						700,29	35,0145
4						729,47	36,4735
5						707,66	35,383
1	2	10	0,15	220	30	679,41	33,9705
2						684,26	34,213
3						693,29	34,6645
4						674,12	33,706
5						683,61	34,1805
1	2	10	0,2	220	30	728,39	36,4195
2						714,25	35,7125
3						761,05	38,0525
4						758,48	37,924
5						712,07	35,6035
1	2	10	0,25	220	30	654,92	32,746
2						648,33	32,4165
3						635,21	31,7605
4						637,81	31,8905
5						640,02	32,001
1	2	10	0,3	220	30	541,92	27,096
2						542,42	27,121
3						534,42	26,721

Продовження таблиці А.4

№	a , мм	b , мм	$\Delta_{шару}$, мм	$t_{друку}$, °С	$V_{друку}$, мм/с	P , Н	σ_{max} , МПа
4	2	10	0,3	220	30	551,07	27,5535
5						538,82	26,941
1	2	10	0,35	220	30	290,04	14,502
2						280,56	14,028
3						283,25	14,1625
4						275,74	13,787
5						277,23	13,8615

А.5. Дослідження зразків, друкованих при різних швидкостях

Таблиця А.5 – Результати випробовувань, друкованих при різних швидкостях

№	a , мм	b , мм	$\Delta_{шару}$, мм	$t_{друку}$, °С	$V_{друку}$, мм/с	P , Н	σ_{max} , МПа
1	2	10	0,2	220	40	683,47	34,1735
2						665,00	33,25
3						680,72	34,036
4						433,57	21,6785
5						702,92	35,146
6						710,38	35,519
7						673,74	33,687
8						688,55	34,4275
9						510,32	25,516
10						698,68	34,934
11						502,44	25,122
12						670,5	33,525
13						685,72	34,286
14						705,22	35,261
15						692,48	34,624
16						690,54	34,527
17						680,49	34,0245
18						683,25	34,1625
19						688,57	34,4285
20						694,35	34,7175
1	2	10	0,2	220	50	610,34	30,517
2						591,45	29,5725

Продовження таблиці А.5

№	a , мм	b , мм	$\Delta_{шару}$, мм	$t_{дружу}$, °С	$V_{дружу}$, мм/с	P , Н	σ_{max} , МПа					
3	2	10	0,2	220	50	621,72	31,086					
4						387,82	19,391					
5						620,38	31,019					
6						210,58	10,529					
7						578,64	28,932					
8						573,06	28,653					
9						614,61	30,7305					
10						184,67	9,2335					
11						365,48	18,274					
12						635,32	31,766					
13						612,42	30,621					
14						311,98	15,599					
15						594,42	29,721					
16						605,27	30,2635					
17						633,38	31,669					
18						621,26	31,063					
19						585,55	29,2775					
20						263,48	13,174					
1						2	10	0,2	220	60	410,23	20,5115
2											452,37	22,6185
3	437,75	21,8875										
4	173,55	8,6775										
5	132,07	6,6035										
6	421,73	21,0865										
7	436,95	21,8475										
8	154,23	7,7115										
9	414,84	20,742										
10	442,59	22,1295										
11	56,48	2,824										
12	428,35	21,4175										
13	424,48	21,224										
14	421,95	21,0975										
15	134,23	6,7115										
16	408,45	20,4225										
17	412,28	20,614										
18	102,95	5,1475										
19	418,22	20,911										
20	441,26	22,063										
1	2	10	0,2	220	70	610,34	30,517					
2						591,45	29,5725					

Продовження таблиці А.5

№	a , мм	b , мм	$\Delta_{шару}$, мм	$t_{друку}$, °С	$V_{друку}$, мм/с	P , Н	σ_{max} , МПа
3	2	10	0,2	220	70	188,53	9,4265
4						144,44	7,222
5						251,65	12,5825
6						223,75	11,1875
7						105,89	5,2945
8						137,44	6,872
9						108,06	5,403
10						210,27	10,5135
11						173,25	8,6625
12						185,21	9,2605
13						192,35	9,6175
14						143,57	7,1785
15						175,32	8,766
16						184,68	9,234
17						188,78	9,439
18						190,36	9,518
19						191,26	9,563
20						201,68	10,084

А.6. Дослідження друкованих зразків після термообробки

Таблиця А.6 – Результати випробовувань друкованих зразків на розтяг після термічної обробки

№	a , мм	b , мм	$\Delta_{шару}$, мм	$t_{друку}$, °С	$t_{обробки}$, °С	$T_{обробки}$, год	P , Н	σ_{max} , МПа
1	2	10	0,2	220	70	1	485,53	24,2765
2							476,85	23,8425
3							481,68	24,084
4							484,12	24,206
1	2	10	0,2	220	80	1	300,72	15,036
2							298,05	14,9025
3							305,84	15,292
4							304,9	15,245
1	2	10	0,2	220	90	1	124,38	6,219
2							125,17	6,2585
3							127,63	6,3815
4							120,59	6,0295

Продовження таблиці А.6

№	a , мм	b , мм	$\Delta_{шару}$, мм	$t_{друку}$, °С	$t_{обробки}$, °С	$T_{обробки}$, год	P , Н	σ_{max} , МПа
1	2	10	0,2	220	100	1	102,5	5,125
2							99,47	4,9735
3							98,12	4,906
4							100,05	5,0025
1	2	10	0,2	220	70	2	117,24	5,862
2							121,78	6,089
3							115,88	5,794
4							116,12	5,806
1	2	10	0,2	220	80	2	102,87	5,1435
2							101,65	5,0825
3							103,98	5,199
4							104,12	5,206
1	2	10	0,2	220	90	2	93,54	4,677
2							94,68	4,734
3							92,15	4,6075
4							94,88	4,744
1	2	10	0,2	220	100	2	90,95	4,5475
2							89,17	4,4585
3							88,78	4,439
4							91,05	4,5525

А.7. Дослідження друкованих зразків після опромінення

Таблиця А.7 – Результати випробовувань друкованих зразків на розтяг після опромінення

№	a , мм	b , мм	$\Delta_{шару}$, мм	$t_{друку}$, °С	$T_{опромінення}$, с	P , Н	σ_{max} , МПа
1	2	10	0,2	220	600	101,35	5,362
2						476,85	5,467
3						481,68	5,421
4						484,12	5,382
1	2	10	0,2	220	800	485,53	4,144
2						476,85	4,154
3						481,68	4,14
4						484,12	4,151

Продовження таблиці А.7

№	a , мм	b , мм	$\Delta_{шару}$, мм	$t_{дрвуку}$, °С	$T_{опромінення}$, с	P , Н	σ_{max} , МПа
1	2	10	0,2	220	1000	101,35	3,677
2						476,85	3,586
3						481,68	3,59
4						484,12	3,621
1	2	10	0,2	220	1200	485,53	3,548
2						476,85	3,628
3						481,68	3,615
4						484,12	3,459

ДОДАТОК Б
РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИНАМІКИ РУХУ ДРУКУВАЛЬНОЇ
ГОЛОВКИ

Б.1. Визначення геометричних параметрів друкованого зразка

Таблиця Б.1 – Результати вимірювань розподілу товщин та мас по довжині зразка

a , мм	b , мм	$\Delta_{шару}$, мм	$t_{друку}$, °C	S , мм	a' , мм	m , г
0,5	100	0,2	220	0-10	0,42	0,104
				10-20	0,45	0,095
				20-30	0,47	0,1075
				30-40	0,5	0,115
				40-50	0,52	0,13
				50-60	0,52	0,13
				60-70	0,53	0,135
				70-80	0,55	0,1425
				80-90	0,56	0,145
				90-100	0,6	0,155

Б.1. Дослідження динаміки руху друкувальної головки в залежності від кінематичної схеми FDM 3D принтера

Таблиця Б.1 – Результати вимірювань швидкості руху друкувальної на різних ділянках друку зразка для механіки типу Prusa i3

a , мм	b , мм	$\Delta_{шару}$, мм	$t_{друку}$, °C	S , мм	$N_{кадрів}$, од.	$T_{руху}$, с	$V_{друку}$, мм/с
0,5	100	0,2	220	0	5	0,083	0,00
				10	29	0,567	20,69
				20	27	1,017	22,22
				30	24	1,417	25,00
				40	24	1,817	25,00
				50	24	2,217	25,00

Продовження таблиці Б.1

a , мм	b , мм	$\Delta_{\text{шару}}$, мм	$t_{\text{друку}}$, °C	S , мм	$N_{\text{кадрів}}$, од.	$T_{\text{руху}}$, с	$V_{\text{друку}}$, мм/с
0,5	100	0,2	220	60	24	2,617	25,00
				70	24	3,017	25,00
				80	24	3,417	25,00
				90	24	3,817	25,00
				99,9	27	4,267	22,22
				100	5	4,350	0,00
0,5	100	0,2	220	110	20	4,683	30,00
				120	17	4,967	35,29
				130	17	5,250	35,29
				140	17	5,533	35,29
				150	17	5,817	35,29
				160	17	6,100	35,29
0,5	100	0,2	220	170	17	6,383	35,29
				180	17	6,667	35,29
				190	17	6,950	35,29
				200	5	7,033	0,00

Таблиця Б.2 – Результати вимірювань швидкості руху друкувальної головки на різних ділянках друку зразка для механіки типу H-Vot

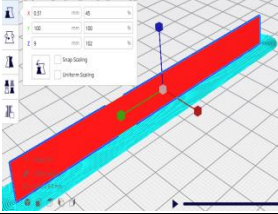
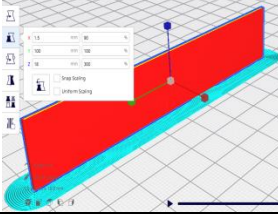
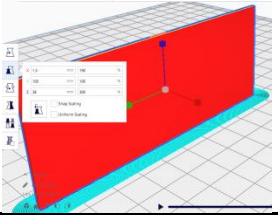
a , мм	b , мм	$\Delta_{\text{шару}}$, мм	$t_{\text{друку}}$, °C	S , мм	$N_{\text{кадрів}}$, од.	$T_{\text{руху}}$, с	$V_{\text{друку}}$, мм/с
0,5	100	0,2	220	0	4	0,067	0,00
				10	24	0,467	25,00
				20	22	0,833	27,27
				30	19	1,150	31,58
				40	19	1,467	31,58
				50	19	1,783	31,58
				60	19	2,100	31,58
				70	19	2,417	31,58
				80	19	2,733	31,58
				90	19	3,050	31,58
				99,9	22	3,417	27,27
				100	4	3,483	0,00
				110	17	3,767	35,29
				120	15	4,017	40,00
				130	15	4,267	40,00

Продовження таблиці Б.2

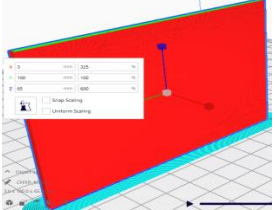
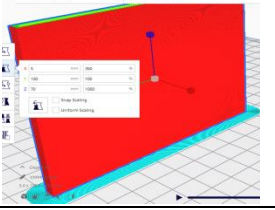
a , мм	b , мм	$\Delta_{шару}$, мм	$t_{друку}$, °C	S , мм	$N_{кадрів}$, од.	$T_{руху}$, с	$V_{друку}$, мм/с
0,5	100	0,2	220	140	15	4,517	40,00
				150	15	4,767	40,00
				160	15	5,017	40,00
				170	15	5,267	40,00
				180	15	5,517	40,00
				190	15	5,767	40,00
				200	4	5,833	0,00

Б.3. Дослідження продуктивності друку в залежності від кінематичної схеми FDM 3D принтера

Таблиця Б.3 – Результати вимірювань продуктивності друку для механік типу Prusa і3 та H-Bot

№	Зображення деталі	$m_{зр}$, Г	$V_{оп}$, мм/с	$T_{теор}$, с	$T_{факт}$, с		Відносна затримка, %		P , г/хв	
					H-Bot	Prusa	H-Bot	Prusa	H-Bot	Prusa
1		1,39	20	608	671	4,70	4,70	9,39	0,131	0,124
			30	403	435	3,59	3,59	7,36	0,200	0,192
			40	308	318	331	3,14	6,95	0,262	0,252
			50	247	253	261	2,37	5,36	0,330	0,320
2		4,21	20	2010	2150	2421	6,51	16,98	0,117	0,104
			30	1345	1424	1517	5,55	11,34	0,177	0,167
			40	985	1032	1083	4,55	9,05	0,245	0,233
			50	807	836	873	3,47	7,56	0,302	0,289
3		8,05	20	4023	4371	5112	7,96	21,30	0,111	0,094
			30	2712	2910	3247	6,80	16,48	0,166	0,149
			40	1985	2105	2343	5,70	15,28	0,229	0,206
			50	1595	1673	1852	4,66	13,88	0,289	0,261

Продовження таблиці Б.3

№	Зображення деталі	$m_{зр}, \Gamma$	$V_{др}, \text{мм/с}$	$T_{теор}, \text{с}$	$T_{факт}, \text{с}$		Відносна затримка, %		$P, \Gamma/\text{хв}$	
					H-Bot	Prusa	H-Bot	Prusa	H-Bot	Prusa
4		25,32	20	10053	11268	13585	10,78	26,00	0,135	0,112
			30	6681	7212	8634	7,36	22,62	0,211	0,176
			40	5017	5286	5921	5,09	15,27	0,287	0,257
			50	4045	4231	4533	4,40	10,77	0,359	0,335
5		39,52	20	19983	23512	28512	15,01	29,91	0,101	0,083
			30	13401	14659	17737	8,58	24,45	0,162	0,134
			40	10105	10914	12615	7,41	19,90	0,217	0,188
			50	7985	8530	9627	6,39	17,06	0,278	0,246

ДОДАТОК В
ДОКУМЕНТИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ
РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

ТОВ «ТУКАНА ІНЖИНІРИНГ УКРАЇНА»

Код ЄДРПОУ 41071518
 п/р UA21380805000000026000554305
 в АТ «Райффайзен Банк Аваль»
 МФО 380805
 Місцезнаходження: 04116, м. Київ, вул. Шолуденка, 3
 тел/факс: +380 (44) 520-57-67
 email: info.ua@tucana.aero, www.tucana.aero

**АКТ**

**впровадження результатів науково-технічних розробок,
 виконаних аспірантом кафедри ХПСМ ІХФ КПІ ім. Ігоря Сікорського Олексієм В.О.
 під керівництвом д.т.н., професора кафедри ХПСМ ІХФ КПІ ім. Ігоря Сікорського
 Колосова О.Є.**

Цим актом підтверджуємо, що результати науково-технічних розробок інженерно-хімічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в рамках виконання держбюджетної теми №2027-п "Конкурентоспроможна технологія формування конструкційних виробів з традиційних та наномодифікованих полімерних композиційних матеріалів", номер державної реєстрації 0117U000444, впроваджено на ТОВ "ТУКАНА ІНЖИНІРИНГ УКРАЇНА" (науковий керівник - д.т.н., проф. Колосов О.Є., відповідальний виконавець – асп. Олексієн В.О.).

Науковцями КПІ ім. Ігоря Сікорського було розроблено та передано до використання на ТОВ "ТУКАНА ІНЖИНІРИНГ УКРАЇНА" науково-технічний продукт у вигляді методики автоматизованого проектування та 3D-моделей обладнання для виготовлення моделей для аеродинамічних досліджень в якому застосовано сучасний підхід до проектування та моделювання.

Створені тривимірні моделі конструкцій та вузлів дозволяють більш точно обґрунтувати вибір їх геометричних та конструктивних параметрів і уникнути багатьох помилок, характерних при використанні традиційних двовимірних креслень.

Було встановлено, що використання запропонованої методики автоматизованого проектування і конструктивних пропозицій дозволяє вдосконалити параметри та конструкції робочих органів, за яких забезпечується підвищена якість та точність виробів за умов зниження трудоемності процесів їх виробництва.

Очікуваний економічний ефект від впровадження технічних пропозицій з удосконалення конструктивного оформлення обладнання для виготовлення аеродинамічних моделей при його створенні на ТОВ "ТУКАНА ІНЖИНІРИНГ УКРАЇНА" складає 243 (двісті сорок три) тис. грн. на рік.

Цей акт не є підставою для пред'явлення фінансових вимог

Головний інженер



[Handwritten signature]
 26.08.2020

С.Л.Ткаченко

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор Національного технічного
університету України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»,
академік НАН України



Юрій ЯКИМЕНКО

2020 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи **Віталія ОЛЕКСИШЕНА**
на тему «**Вдосконалення обладнання для одержання полімерних виробів методом
просторового друку**»,
що представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Цим актом засвідчується, що дисертаційна робота аспіранта кафедри хімічного, полімерного і силікатного машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Віталія ОЛЕКСИШЕНА на тему «Вдосконалення обладнання для одержання полімерних виробів методом просторового друку», що представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії, відповідає напряму наукових досліджень КПІ ім. Ігоря Сікорського і безпосередньо пов'язана з навчальним процесом.

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри хімічного, полімерного і силікатного машинобудування інженерно-хімічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського, починаючи з 2018 року і до цього часу, під час проведення лекційних занять та лабораторних робіт з дисциплін «Комп'ютерний дизайн» та «Технології композиційних матеріалів».

Впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес забезпечується фізичними й математичними моделями, експериментальними установками, методами конструкторського проектування, методиками експериментальних досліджень, створення 3D-моделей та 3D-друку полімерних виробів.

Впровадження матеріалів дисертаційної роботи дає змогу студентам отримати, поглибити, систематизувати й закріпити досвід фізичного й математичного моделювання, а також конструкторського проектування і створення об'єктів методами адитивного виробництва.

Декан інженерно-хімічного факультету,
д.т.н., професор

Євген ПАНОВ

В. о. завідувача кафедри хімічного,
полімерного та силікатного машинобудування,
д.т.н., професор

Олександр ГОНДЛЯХ