

Міністерство освіти і науки України
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
Міністерство освіти і науки України
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Сіренко Максим Костянтинович

УДК 620.171.2, 620.171.3

**РОЗРОБКА ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПОШАРОВОГО
СИНТЕЗУ ВИРОБІВ З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ
МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ АВІАЦІЙНОЇ ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ
ТЕХНІКИ**

Спеціальність 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка

Галузь 13 Механічна інженерія

Подається на здобуття ступеня доктора філософії.

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

М.К. Сіренко

Науковий керівник:

Карпович Олена Володимирівна

кандидат технічних наук, доцент

Дніпро – 2025 р.

АНОТАЦІЯ

Сіренко М.К. Розробка та вдосконалення технології пошарового синтезу виробів з полімерних композиційних матеріалів для авіаційної та ракетно-космічної техніки. Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії, спеціальність 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка. Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, м. Дніпро, 2025.

Дисертаційна робота присвячена удосконаленню технологій пошарового синтезу виробів з полімерних композиційних матеріалів з метою покращення характеристик міцності деталей та виробів. В роботі використовувались методи моделювання, аналізу матеріалів та виробів методом скінченних елементів та експериментальні дослідження зразків.

Технології виробництва в усіх галузях машинобудування переходять до все більш і більш широкого використання новітніх та передових технологій для покращення ефективності виробництва і якості виробів. Авіаційна та ракетно-космічна промисловість також продовжує розвиток та впровадження нових технологій. Основна мета – покращення експлуатаційних характеристик виробів, а саме – покращення масової досконалості конструкції літальних апаратів. Це можливо завдяки не тільки використанням нових конструкцій та матеріалів, а й завдяки новітнім технологіям виробництва. Наприклад, широкий спектр технологій адитивного виробництва дозволяє покращити ефективність виробництва та розширити номенклатуру виробів, що може бути виготовлена на одному типі обладнання.

Пошаровий синтез дозволяє виготовляти деталі набагато складної геометрії з меншими капітальними затратами на обладнання та пристрої. Також він дозволяє проектувати більш досконалі вузли та деталі, з більш складною геометрією, які було б набагато складніше виготовити традиційними методами виробництва. В даному випадку до традиційних відносяться типи виробництва та обробки деталей, що працюють з видаленням матеріалу з певного фіксованого об'єму заготовки. На відміну від цього, пошаровий синтез передбачає додавання матеріалу у вигляді порошку, прутка, смоли в робочу

область, нарощуючи деталь шар за шаром. Це не тільки покращує коефіцієнт використання матеріалу, а й дозволяє виготовляти як одну деталь виробу, які традиційно складаються з багатьох деталей. Можливість використання одного типу обладнання для виробництва широкого спектру деталей також дозволяє ширше уніфікувати етапи виробництва та технологічні процеси.

Хоча зараз в розвитку в сфері пошарового синтезу переважають технології, що використовують у якості матеріалу метал, технології синтезу з полімерів також продовжують займати значний сегмент виробництва. Полімери пошарового синтезу дозволяють створювати деталі складної форми ефективніше, особливо якщо вироби не піддаються великим навантаженням, або створення їх з більш традиційних матеріалів і традиційними методами було б більш дорогим чи мало більші затрати праці. Але все ж, полімерні пошарові технології також вимагають покращення. Один з методів – використання композитних матеріалів замість чистого полімеру. Це дозволяє підвищити питому міцність та інші механічні та експлуатаційні параметри виробів. І хоча технології пошарового синтезу вже доволі широко представлені на ринку та в промисловості, вони все ще можуть бути поліпшені.

У рамках дисертаційної роботи спочатку був проведений аналіз існуючих технологій пошарового синтезу деталей з полімерних матеріалів та з полімерних композиційних матеріалів, розглянуті та проаналізовані основні матеріали, які використовуються. Окрема увага була приділена аспектам застосування цих технологій та методів в авіаційній та ракетно-космічній техніці. В ході аналізу були встановлені основні недоліки, над усуненням яких необхідно працювати. За основні недоліки було прийнято недотримання суцільності волокна армування, неможливість точного та вибіркового контролю положення волокна у межах шару, а також недостатня прогнозованість кінцевих характеристик.

У наступному розділі було обрано матеріали, що використовувались для дослідження, обґрунтовано вибір основного полімерного матеріалу та матеріалу армування. У якості основного полімеру був прийнятий сополімер

поліетилентерефталату (coPET), у якості армуючого волокна – базальтоне волокно. Обґрунтовано критерії, по яким розроблюється нова структура армування та розроблено структуру нового типу армування деталей в процесі FDM/FFF 3D-друку з метою отримання деталей з полімерного композиційного матеріалу. Розроблена структура являє собою пошарово прокладене волокно між шарів друкованого основного полімеру, причому розрізів чи інших порушень суцільності в межі шару немає. Також, завдяки відсутності розрізів при переході волокна між шарами, зберігається і суцільність волокна між шарами. Розглядаючи одиничне волокно, його суцільність не порушується в всьому об'ємі деталі. Крім цього, були розглянуті методи дослідження та контролю. В контексті можливості та особливостей використання до виробів, виготовлених 3D-друком, була проаналізована низка видів неруйнівного та руйнівного контролю та випробувань. Також був розглянутий аспект їх використання при наявності неперервного волокна армування в основному полімері. Як той вид, що буде використаний в роботі, було прийняте дослідження міцності шляхом випробувань на розтяг.

У третьому розділі було розроблено технологічне обладнання для встановлення на FDM/FFF 3D-принтер з кінематикою Delta. Ця кінематика також була обрана відповідно до проведеного аналізу. Обладнання являє собою вузли, що встановлюються на платформу побудови 3D-принтеру та виконують функції утримання, направлення та контролю положення і натягу волокна. Обладнання дозволяє виконувати однонаправлене армування полімеру в процесі друку. Як завдання для випробувань, було заплановано проведення аналізу впливу частоти прокладання шару армуючого волокна на характеристики міцності матеріалу та аналіз впливу щільності заповнення на них. Відповідно, за допомогою обладнання було виготовлено партії зразків з полімерного композиційного матеріалу та були проведені випробування зразків. По результатам, межа міцності зросла, в варіанті армування з найкращими результатами, на 80%, модуль пружності – на 101%. Також була встановлена залежність міцносних властивостей зразків та матеріалу від

частоти прокладання волокна, і це є основний і найбільш впливовий чинник впливу на властивості.

Четвертий розділ був присвячений підтвердженню результатів випробувань на реальній деталі відповідно до її умов експлуатації. Для цього була зроблена модель деталі складної форми засобами САД програмного забезпечення Solidworks. За допомогою САЕ модулю цієї програми до деталі було накладено матеріал з характеристиками, що були отримані в результаті експерименту. Далі проводилось дослідження деталі на визначення сили, при якій відбулось її руйнування. Після цього була виготовлена партія деталей для випробувань. По результатам випробувань, середнє відхилення фактичного навантаження руйнування від розрахункового склало не більше 12%. Це прийнятний результат для інженерних розрахунків деталей з полімерних композиційних матеріалів.

Проведене дослідження в рамках дисертаційної роботи як результат отримало новий метод армування волокном полімерних виробів, створюючи різновид полімерного композиційного матеріалу. Розроблена схема та метод армування, а також спосіб розрахунку кінцевих параметрів деталей і виробів були верифіковані в процесі дослідження. Вони мають дійсне практичне значення і можуть бути впроваджені для виготовлення деталей для ракетно-космічної та авіаційної техніки з метою покращення масової досконалості конструкції за рахунок покращених питомих властивостей міцності.

Ключові слова: авіаційна та ракетно-космічна техніка, адитивні технології, пошаровий синтез, 3D-друк, полімерні композиційні матеріали, армування волокном, метод скінчених елементів.

ABSTRACT

Sirenko M.K. Development and improvement of the technology of layer-by-layer synthesis of products from polymer composite materials for aviation and rocket and space technology. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, specialty

134 Aviation and Rocket and Space Technology. Dnipro National University named after O. Honchar, Dnipro, 2025.

The dissertation is devoted to the improvement of the technology of layer-by-layer synthesis of products from polymer composite materials in order to improve the strength characteristics of parts and products. The work used methods of modeling, analysis of materials and products by the finite element method and experimental studies of samples.

Production technologies in all branches of mechanical engineering are moving towards more and more widespread use of the latest and advanced technologies to improve production efficiency and product quality. The aviation and rocket and space industry also continues to develop and introduce new technologies. The main goal is to improve the performance of products, one of the main ones is to improve the mass perfection of aircraft designs. This is possible not only through the use of new designs and materials, but also through the latest production technologies. For example, a wide range of additive manufacturing technologies allows you to improve production efficiency and expand the range of products that can be manufactured on one type of equipment.

Layer-by-layer synthesis allows you to manufacture parts of much more complex geometry with less capital expenditure on equipment and fixtures. It also allows you to design more advanced assemblies and parts with more complex geometry, which would be much more difficult to manufacture using traditional production methods. In this case, traditional types of production and processing of parts that work with the removal of material from a certain fixed volume of the workpiece. In contrast, layer-by-layer synthesis involves adding material in the form of powder, rod, resin, etc. to the working area, building up the part layer by layer. This not only improves material utilization, but also allows products that are traditionally composed of many parts to be manufactured as a single body. The ability to use one type of equipment to produce a wide range of parts also allows for greater standardization of production steps and processes.

Although currently the development in the field of layer-by-layer synthesis is dominated by technologies that use metal as a material, polymer synthesis technologies also continue to occupy a significant segment of production. Polymers of layer-by-layer synthesis allow you to create parts of complex shape more efficiently, especially if the products are not subjected to high loads, or their creation from more traditional materials and traditional methods would be more expensive or require a little more labor. However, polymer layer-by-layer technologies also require improvement. One of the methods is the use of composite materials instead of pure polymer. This allows you to increase the specific strength and other mechanical and operational parameters of products. And although layer-by-layer synthesis technologies are already quite widely represented on the market and in industry, they can still be improved.

As part of the dissertation work, an analysis of existing technologies for layer-by-layer synthesis of parts from polymeric materials and polymeric composite materials was first conducted, the main materials used were considered and analyzed. Special attention was paid to aspects of the application of these technologies and methods in aviation and rocket and space technology. During the analysis, the main shortcomings were identified, the elimination of which requires work. The main shortcomings were considered to be non-compliance with the continuity of the reinforcing fiber, the impossibility of precise and selective control of the position of the fiber within the layer, as well as insufficient predictability of the final characteristics. In the next section, the materials used for the study were selected, the choice of the main polymeric material and the reinforcing material was justified. A copolymer of polyethylene terephthalate (coPET) was taken as the main polymer, and basalt fiber as the reinforcing fiber. The criteria for developing a new reinforcement structure are substantiated and a structure of a new type of reinforcement of parts in the FDM/FFF 3D printing process is developed in order to obtain parts from a polymer composite material. The developed structure is a layer-by-layer fiber laid between the layers of the printed base polymer, and there are no cuts or other disruptions of continuity at the layer boundary. Also, due to the absence

of cuts at the transition of the fiber between layers, the continuity of the fiber between layers is also preserved. Considering a single fiber, its continuity is not disturbed throughout the entire volume of the part. In addition, research and control methods were considered. In the context of the possibilities and features of using products manufactured by 3D printing, a number of types of non-destructive and destructive testing and testing were analyzed. The aspect of their use in the presence of continuous reinforcing fibers in the main polymer was also considered. The type that will be used in the work was taken as the study of strength by tensile testing.

In the third section, a technological device was developed for installation on an FDM/FFF 3D printer with Delta kinematics. This kinematics was also selected in accordance with the analysis. The device is a set of nodes that are installed on the 3D printer construction platform and perform the functions of holding, directing and controlling the position and tension of the fiber. The device allows for unidirectional reinforcement of the polymer during the printing process. As a task for the tests, it was planned to analyze the influence of the frequency of laying the reinforcing fiber layer on the strength characteristics of the material and analyze the influence of the filling density on them. Accordingly, using the device, batches of samples from a polymer composite material were manufactured and the samples were tested. According to the results, the tensile strength increased, in the reinforcement variant with the best results, by 80%, the modulus of elasticity - by 101%. The dependence of the strength properties of the samples and the material on the frequency of laying the fiber was also established, and this is the main and most influential factor affecting the properties.

The fourth section was devoted to confirming the test results on a real part according to its operating conditions. For this purpose, a model of a complex-shaped part was created using the Solidworks CAD software. Using the CAE module of this program, a material with the characteristics obtained as a result of the experiment was applied to the part. Then, the part was studied to determine the force at which its failure would occur. After that, a batch of parts was manufactured for testing. According to the test results, the average deviation of the actual failure load from

the calculated one was no more than 12%. This is an acceptable result for engineering calculations of polymer composite materials.

The research conducted within the framework of the dissertation work resulted in a new method of fiber reinforcement of polymer products, creating a type of polymer composite material. The developed scheme and method of reinforcement, as well as the method of calculating the final parameters of parts and products were verified in the research process. They have real practical significance and can be implemented for the manufacture of parts for rocket and space and aviation technology in order to improve the mass perfection of the design due to improved specific strength properties.

Keywords: aviation and rocket and space technology, additive technologies, layer-by-layer synthesis, 3D printing, polymer composite materials, fiber reinforcement, finite element method.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Публікації у фахових виданнях України категорії Б:

Сіренко, М., & Карпович, О. (2023). Перспективи розвитку 3d-друку виробів у авіаційній та ракетно-космічній галузі із полімерних матеріалів з композиційним армуванням. *Journal of Rocket-Space Technology*, 30(4), 9-14. <https://doi.org/10.15421/452202> (особистий внесок Сіренка М.К.: огляд методів друку та матеріалів; особистий внесок Карпович О.В.: формулювання і постановка мети дослідження, формулювання висновків)

Сіренко, М., & Карпович, О. (2023). Моделювання вузла подавання армуючого волокна при 3d-друку виробів із полімерних матеріалів з композиційним армуванням у авіаційній та ракетно-космічній галузі. *Journal of Rocket-Space Technology*, 31(4), 116-120. <https://doi.org/10.15421/452315> (особистий внесок Сіренка М.К.: аналіз тяглових вузлів для подачі волокна, розробка та створення моделі вузла подачі; особистий внесок Карпович О.В.: формулювання висновків, проведення експериментальних досліджень)

Сіренко, М., & Карпович, О. (2024). Методи контролю якості деталей РКЛА, що виготовлені методом 3d-друку з композиційних полімерних матеріалів. *Journal of Rocket-Space Technology*, 33(4-27), 55-61. <https://doi.org/10.15421/452408> (особистий внесок Сіренка М.К.: аналіз методів контролю та аналізу, формулювання висновків; особистий внесок Карпович О.В.: постановка задачі дослідження)

Сіренко, М., & Карпович, О. (2025). Експериментальне дослідження міцносних характеристик деталей армованих композиційним волокном. *Journal of Rocket-Space Technology*, 34(1), 31-38. <https://doi.org/10.15421/452503> (особистий внесок Сіренка М.К.: розробка схеми армування, розробка та виготовлення технологічного обладнання, виготовлення зразків для випробувань, проведення випробувань; особистий внесок Карпович О.В.: постановка задачі дослідження, обробка експериментальних результатів)

Апробації на конференціях:

М.К. Сіренко, О.В. Карпович. Розробка способу пошарового армування волокном деталей РКЛА при FFF 3d-друці // *XXV Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина І Космос»*. Збірник тез. – 2023. С. 205.

М.К. Сіренко, О.В. Карпович, Н.С. Носкова. Розробка вузла подавання армуючого волокна при FDM 3D-друці виробів для РКЛА // *XXVI Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина І Космос»*. Збірник тез. – 2024. С. 232.

М.К. Сіренко, О.В. Карпович. Методи наповнення композиційним волокном деталей РКЛА, що були отримані методами адитивного виробництва. // *XXVII Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина І Космос»*. Збірник тез. – 2025. С. 280.

Sirenko, M., & Karpovych, O. (2023). Improvement of the reinforcing fiber feed node for 3D printing of composite-reinforced products. *Challenges and Issues of Modern Science*, 1, 160-164. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/31>

Sirenko, M., & Karpovych, O. (2024). Improvement of reinforcement technique of parts with composite fiber in FDM 3D-printing. *Challenges and Issues of Modern Science*, 2, 148-152. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/170>

ЗМІСТ

Вступ	14
1 Аналіз тенденцій використання технологій пошарового синтезу деталей з полімерних композиційних матеріалів у авіаційній та ракетно-космічній техніці.....	19
1.1 Огляд методів пошарового синтезу та можливостей їх застосування в авіаційній та ракетно-космічній техніці	19
1.2 Полімерні матеріали у пошаровому синтезі	27
1.3 Композиційні матеріали у пошаровому синтезі	36
1.4 Визначення напрямків та завдань дисертаційного дослідження	41
2 Матеріали і методи досліджень. Розробка методу армування.....	43
2.1 Матеріали, які використовувались у дослідженні.....	43
2.2 Структура та схема розробленого методу армування.....	48
2.3 Методи дослідження пошарово наповнених полімерних композиційних матеріалів.....	53
2.4 Висновки до розділу.....	61
3 Розробка технології армування та експериментальне дослідження....	62
3.1 Розробка обладнання для армування за розробленою схемою.....	62
3.2 Виготовлення зразків для випробувань на розтяг та випробування...70	
3.3 Висновки до розділу.....	83
4 Розрахунок деталі з ПКМ і верифікація результатів.....	86
4.1 Обґрунтування верифікації результатів.....	86
4.2 Сутність методу скінчених елементів	87
4.3 Верифікаційний розрахунок деталі з полімерного композиційного матеріалу, виготовленої з використанням методу 3D-друку	90
4.4 Виготовлення зразків для верифікації і результати.....	95
4.5 Висновки до розділу.....	97
Основні висновки.....	98

Список використаних джерел.....	103
Додаток А.....	115
Додаток Б.....	117
Додаток В.....	118

ВСТУП

Актуальність теми

Проблема підвищення експлуатаційних характеристик деталей та виробів, що отримані методами пошарового синтезу, залишається актуальною і по цей день. Особливо це пов'язано зі збільшенням використання адитивного виробництва виробів прямого вжитку в сфері авіаційної та ракетно-космічної техніки. Це пов'язано з потребами підвищення питомих механічних властивостей для покращення масової досконалості техніки та зменшення сухої ваги конструкції.

Зокрема, один із методів підвищення характеристик полімерних виробів – використання полімерних композиційних матеріалів замість звичайних однокомпонентних полімерів. За рахунок наявності наповнювача з більш високими параметрами міцності, полімерні матеріали мають вищі характеристики в порівнянні з базовим полімером. Таким чином, навіть без зміни до конструкції виробів покращується міцність та/або жорсткість деталей, що підвищує їх допустимі навантаження. Найбільший приріст експлуатаційних характеристик та коефіцієнту масової досконалості виробів може бути досягнутий поєднанням використання полімерних композиційних матеріалів з виготовленням деталей методами пошарового синтезу. Пошаровий синтез дозволяє виготовляти вироби більш складної геометрії та форм, отриманих в результаті оптимізації топології. У більшості випадків виробництво таких топологічно-оптимізованих виробів традиційними способами виробництва набагато складніше або взагалі неможливе, через потреби використання технологічних пристроїв складної конструкції та необхідність обробки форм складної просторової конфігурації. Методи пошарового синтезу дозволяють суттєво зменшити потребу у обробці складної геометрії, бо виріб виготовляється методами синтезу вже в готовому вигляді з набагато меншим об'ємом операцій подальшої обробки. Також, оскільки

методи пошарового синтезу є адитивним виробництвом, коефіцієнт використання матеріалу у такому виробництві набагато вищий.

Таким чином, вдосконалення технологій пошарового синтезу з полімерних композиційних матеріалів залишається актуальним завданням для підвищення експлуатаційних характеристик виробів та покращення масової досконалості.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана в Дніпровському національному університеті імені Олеся Гончара в рамках держбюджетної теми «Створення і удосконалення технологій і матеріалів для ракетних засобів ураження на основі інноваційних конструкторсько-технологічних рішень», № державної реєстрації 0123U101855.

Мета і завдання дослідження

Мета дослідження – підвищення механічних та експлуатаційних властивостей виробів з полімерних композиційних матеріалів на основі нових конструктивних і технологічних рішень з використанням методів 3D-друку.

Для досягнення мети дослідження встановлені та розв'язані наступні завдання:

- проаналізовані та визначені основні досягнення та недоліки існуючих технологій пошарового синтезу полімерних композиційних матеріалів;
- досліджений вплив технологічних параметрів на експлуатаційні властивості виробів з полімерних композиційних матеріалів, що отримані методами пошарового синтезу;
- обґрунтовано вибір матеріалів матриці та армуючих елементів;
- розроблено конструкцію і виготовлено технологічне оснащення;

- досліджено вплив параметрів 3D-друку на структуру і властивості отриманого матеріалу;
- розроблено раціональні схеми і режими отримання виробів з полімерних композиційних матеріалів з використанням методу 3D-друку;
- проведено моделювання композиційного матеріалу і виробу з урахуванням реальних умов експлуатації.

Об'єкт дослідження – пошаровий синтез виробів з полімерних композиційних матеріалів.

Предмет дослідження – схеми, методи та параметри технології виготовлення полімерних композиційних матеріалів пошаровим синтезом.

Методи дослідження

При проведенні дослідження використані методи дослідження структури матеріалу, випробування механічних властивостей, методи твердотілого моделювання, методи чисельного моделювання з розрахунковою симуляцією методом скінчених елементів.

Наукова новизна дослідження

Наукова новизна полягає у наступному:

- розроблено нові схему та метод армування деталей волокном в процесі пошарового синтезу для отримання полімерного композиційного матеріалу, які полягають у тому, що армування виконується прокладанням волокна між друкованими шарами основного полімеру з збереженням суцільності волокна;
- встановлено, що армування деталей базальтовим волокном дозволяє підвищити, у випадку найкращих характеристик в залежності від параметрів армування, межу міцності армованого матеріалу на 80% та модуль пружності на 101% по відношенню до неармованого матеріалу;

- доведено, що основним фактором впливу на характеристики виробу є відстань між армованими шарами і встановлена залежність властивостей полімерного композиційного матеріалу від щільності заповнення деталі і відстані між шарами армування. Це дозволяє прогнозувати властивості кінцевого полімерного композиційного матеріалу та активно впливати на них шляхом зміни параметрів армування та 3D-друку;
- з використанням розробленої моделі армованого полімеру отримано значення властивостей виробів, виготовлених з використанням методів 3D-друку.

Практична цінність результатів

Практична цінність дослідження полягає у наступному:

- розроблена схема і метод армування виробів волокном при використанні FDM/FFF 3D-друку, з описом впливу технологічних параметрів друку та рекомендацій щодо їх вибору, розроблено технологічне оснащення для армування, що встановлюється на 3D-принтер з кінематикою типу Delta і прийоми виконання армування;
- запропоновано та обґрунтовано методику механічних випробувань полімерних композиційних матеріалів з шароватою структурою, що отримані методом 3D-друку;
- результати дослідження впроваджені в освітній процес Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара та Національного центру аерокосмічної освіти молоді імені О.М. Макарова (акти впровадження прикладені в додатках А і Б).

Обґрунтованість та достовірність

Використання комплексу сучасних та взаємодоповнюючих методів вивчення структури й властивостей матеріалів, дослідження технологічних

методів і режимів забезпечують достовірність отриманих результатів. Наукові положення, висновки та рекомендації, розвинуті у дисертації, обґрунтовані, проведеним комплексом експериментальних досліджень та реалізацією результатів роботи. Висновки, що сформульовані в роботі, не суперечать класичним уявленням щодо формування структури та властивостей композиційних матеріалів.

Особистий внесок здобувача

Основні результати експериментальної роботи були отримані здобувачем особисто та з його безпосередньої участі. Автором проведено аналіз літературних джерел, розроблено методики проведення експерименту, проведено обробку результатів та їх узагальнення, підготовлені наукові статті та доповіді для міжнародних конференцій. Автором роботи було виготовлено всі досліджувані зразки, проведено механічні випробування. Автором разом з науковим керівником визначені мета, постановка задачі дослідження, обговорення та інтерпретація науково-експериментальних результатів. За результатами усіх етапів роботи здобувачем сформульовано основні висновки, положення та рекомендації дисертаційної роботи.

Апробація матеріалів дослідження

По матеріалам дослідження були опубліковані 4 статті у фахових журналах, опубліковані тези доповідей у збірках тез Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції «Людина і Космос» 2023, 2024 і 2025 років та міжнародної конференції Challenges and Issues of Modern Science у 2023 та 2024 роках.

1 АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПОШАРОВОГО СИНТЕЗУ ДЕТАЛЕЙ З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ У АВІАЦІЙНІЙ ТА РАКЕТНО- КОСМІЧНІЙ ТЕХНІЦІ

1.1 Огляд методів пошарового синтезу та можливостей їх застосування в авіаційній та ракетно-космічній техніці

Технології пошарового синтезу для виробництва деталей і виробів продовжують все більш широко застосовуватись в авіаційній та ракетно-космічній техніці. Пошаровий синтез, який включає в себе певну сукупність технологій адитивного виробництва, полягає в тому, що вироби виготовляються додаванням матеріалу вихідної сировини, на відміну від традиційних способів виробництва, у яких матеріал видаляється з заготовки певного об'єму та форми. Виходячи з цього, одна з переваг технологій пошарового синтезу – покращення ефективності використання матеріалу у виробництві та зменшення об'ємів заготівельних операцій та обладнання для них. Хоча для певних видів пошарового синтезу, операції підготовки вимагають спеціалізованого обладнання та особливих умов зберігання вихідного матеріалу, це компенсується уніфікацією підготовчих процесів та обладнання для виготовлення широкого спектру виробів. Також, оскільки виріб виготовляється в стані готового для використання умовно за одну операцію, це зменшує потребу у технологічних пристроях для утримання і встановлення заготовок та деталей між операціями, в порівнянні з традиційними видами виробництва. Обладнання та прийоми для операцій пост-обробки та контролю також може бути уніфіковане для великої номенклатури виробів та деталей [1].

Крім таких технологічних переваг, пошаровий синтез дозволяє проектувати та виготовляти вироби, що було б складно або неможливо виготовити традиційними технологіями. Через можливість більш вільного

проектування, вироби що традиційно виготовляються як складальний вузол, можуть виготовлятися з меншої кількості деталей чи взагалі бути перекомпонованими в одну деталь. Також перевагою є відсутність необхідності прив'язки конфігурації виробів при проектуванні до існуючого технологічного обладнання, чи необхідності розробки такого обладнання для виробництва. Це, в свою чергу, дозволяє розробляти вироби з оптимізованою топологією та формою, яка забезпечує вищу масову ефективність.

Відповідно до теми, мети та завданню роботи, основна увага буде приділена тим різновидам технологій пошарового синтезу, які у якості основного матеріалу використовують полімерні матеріали. Такі види пошарового синтезу також мають назву 3D-друк. Із найбільш поширених можна виділити наступні види такого пошарового синтезу:

- Fused Deposition Modeling (FDM)/Fused Filament Fabrication (FFF) – цей вид використовує у якості вихідного матеріалу термопластичні полімери (філаменти), що подаються в область побудування у розплавленому, в'язкотекучому стані, і процес побудови йде шар за шаром, починаючи з поверхні друкувального столу за допомогою екструдера з системою нагріву, і побудування об'єктів відбувається за рахунок переміщення екструдера відносно друкувального столу по згенерованій програмі (рис. 1.1);

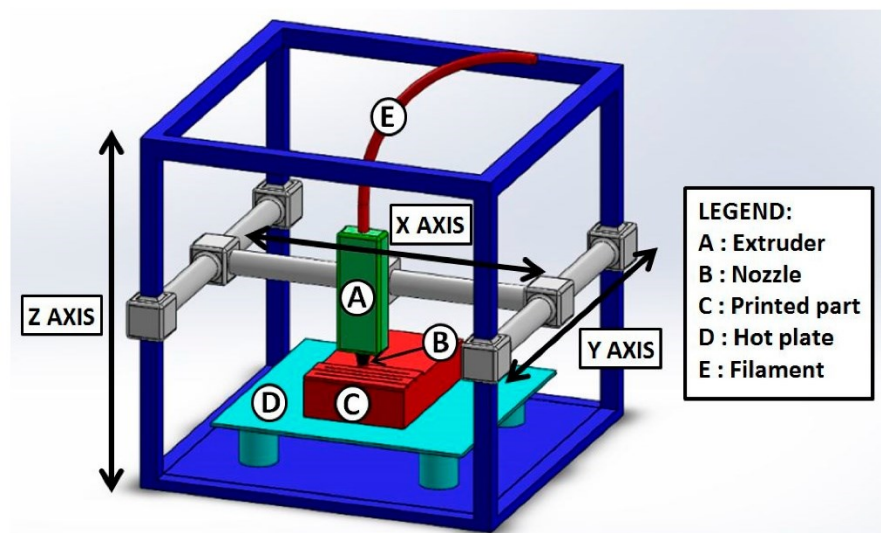


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення FDM/FFF 3D-принтера

- Stereolithography (SLA) – цей вид використовує рідкий полімер у вигляді смоли, що міститься у чані, і друк виконується від платформи побудови, що занурюється в смолу. Для полімерізації смоли використовується лазерний промінь, який засвічує смолу через систему дзеркал, скануючи кожен окремий шар після переміщення платформи побудови на відповідну товщину шару [2] (рис.1.2);

- Direct Light Processing (DLP) – у цьому виді також використовується рідкий полімер – смола, але на відміну від SLA, полімерізація шару смоли виконується за допомогою проектору, що встановлений під чаном смоли, а формування контуру шару відбувається з допомогою рідкокристалічної матриці [3] (рис. 1.2);

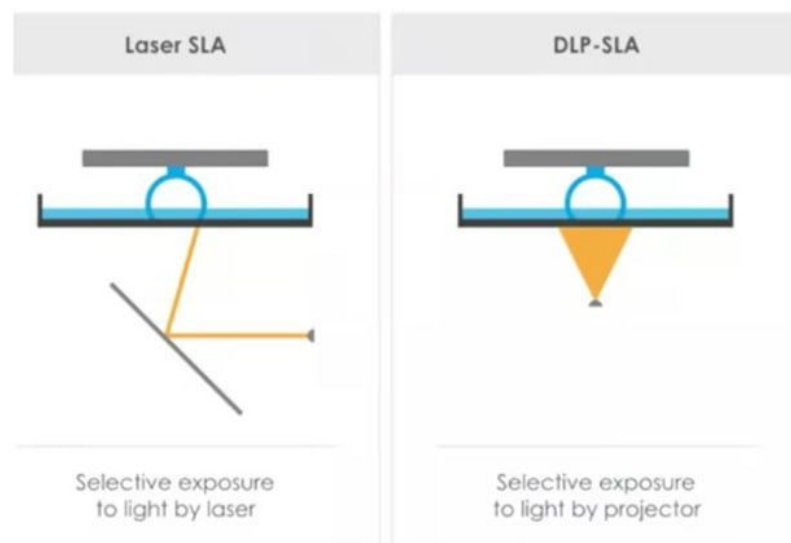


Рисунок 1.2 – Принцип роботи SLA та DLP друку

- Binder Jetting – цей вид використовує дрібнодисперсний порошок полімеру, що рівномірно розподіляється на площині побудови, і для формування шару в площину проекції шару наноситься зв'язуючий матеріал (зазвичай рідина), після чого площина побудови переміщується на товщину

відповідного шару, наноситься і вирівнюється шар порошку для наступного циклу шароутворення (рис. 1.3);

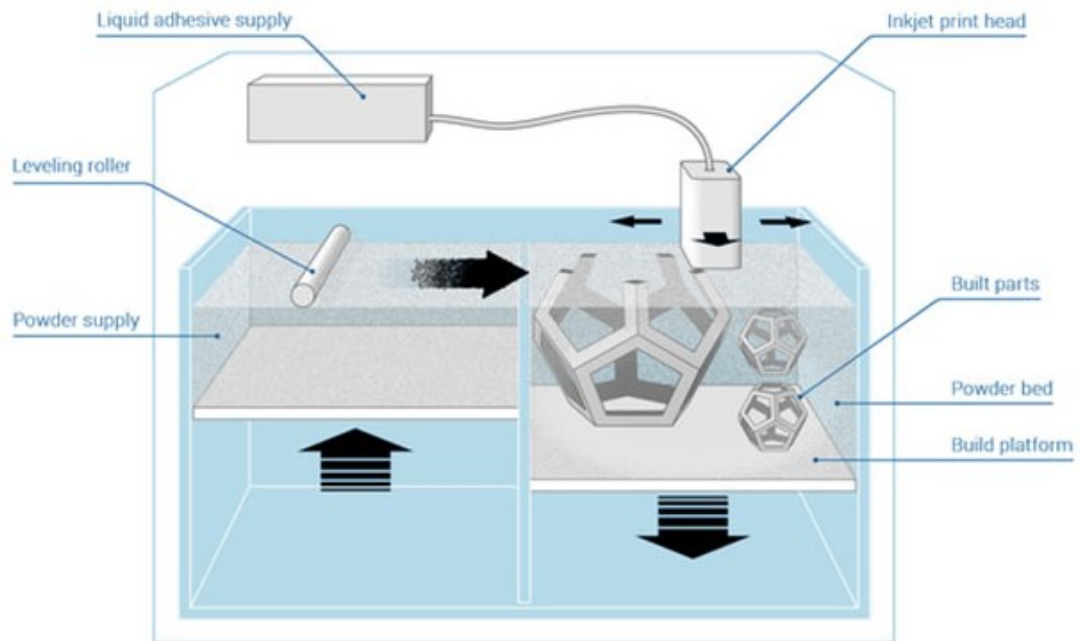


Рисунок 1.3 – Принципова схема Binder Jetting 3D-принтеру

- PolyJet – цей вид використовує багатоструменеву головку, що наносить рідку полімерну смолу, чутливу до УФ – випромінювання, у вигляді крапель, полімерізація яких відбувається відразу після нанесення завдяки системі ламп, змонтованих на каретці. Після кожного циклу нанесення смоли поверхня побудови переміщується на товщину шару для повторення циклу [4] (рис. 1.4).

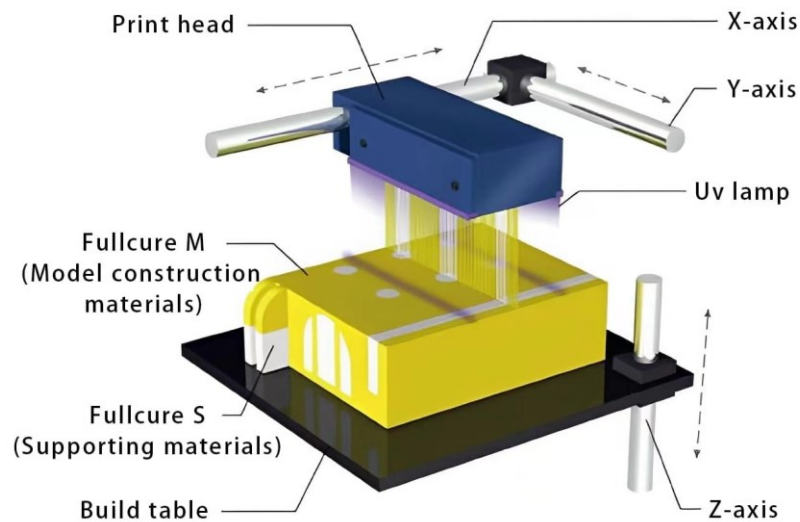


Рисунок 1.4 – Принципова схема PolyJet 3D-друку

Серед видів такого пошарового синтезу, що використовується в сфері авіаційної та ракетно-космічної техніки (АРКТ), найбільш поширеними є FDM/FFF, SLA та DLP. Їх перевагами, що обумовлюють використання, є розмірна стабільність, висока точність виробів, достатньо високі експлуатаційні характеристики полімерів, нижча вартість і менша складність виготовлення одиничних, несерійних виробів та велика кількість існуючих рішень та пропозицій по технологіям та матеріалам.

Перевагами FDM/FFF друку є широкий асортимент матеріалів і їх відносно низька вартість (у порівнянні з порошковими полімерами чи смолами), низька маса матеріалу та кінцевих виробів, простота та доступність основних форм пост-обробки, висока ударна в'язкість полімерів (у порівнянні з порошковими полімерами і смолами). Це дозволяє використовувати їх для синтезу як кінцевих деталей, так і прототипів чи технологічного оснащення.

Використання FDM для виробництва прототипів було початковим призначенням/використанням цього виду синтезу, через малу вартість матеріалу, високу швидкість прототипування та низькі затрати праці. Цей вид полімерного синтезу характеризується достатньо високою точністю геометрії,

що дозволяє полімерним прототипам бути достовірним представленням деталей та виробів, що у кінцевому вигляді будуть виготовлені з більш дорогих матеріалів чи способом виробництва з більшими затратами праці. Також, завдяки добре дослідженим характеристикам полімерів та можливості змінювати кінцеві характеристики виробу за допомогою налаштування технологічних параметрів синтезу, можливо моделювати функціональну аналогію полімерного прототипу до кінцевого виробу. Таким способом отримують масово-габаритні зразки обладнання та пристроїв, елементи для прототипів розміщення обладнання та компонування, деталі для відпрацювання складальних операцій, тощо.

Виробництво технологічного оснащення за допомогою FDM/FFF синтезу широко поширено через можливість швидкого створення оснащення під індивідуальні потреби кожного виробу на кожну технологічну операцію. Наявність усього лиш одного принтеру дозволяє на місці реалізувати такі виробничі спроможності, що зменшує технологічні простої та прибирає необхідність затрат часу і коштів на замовлення оснащення у інших виробників. Висока міцність та ударна в'язкість полімерів, що забезпечується технологією синтезу, часто задовольняють потреби виробництв, а легкість пост-обробки дозволяє проводити невеликі зміни конструкції та підлаштування «по місцю» без необхідності повторного виробництва деталей чи залучення спеціального обладнання. Розглядаючи питання жорсткості та твердості контактних поверхонь, перевагою деталей отриманих FDM/FFF синтезом є можливість термообробки полімеру для покращення їх властивостей чи нанесення покриттів. Так можна виготовляти захватні пристрої, деталі та вузли складальних пристроїв, технологічні ложементи, форми для викладки і лиття, деталі напрямних та кондукторних пристосувань, тощо. Окрім цього, можливо виготовляти інструменти методами FDM/FFF друку, у випадку потреби у специфічних інструментах, необхідності інструменту «на один раз». Також створення інструментів на місці актуальне у

випадках коли доставка чи виробництво інструменту на замовлення пов'язано з логістичними та/або економічними складнощами.

Виробництво кінцевих і функціональних деталей FDM/FFF синтезом набуває все більшого поширення, оскільки в обладнанні все ширше впроваджуються технології швидкого, масового виробництва, які дозволяють зменшувати недоліки, пов'язані з недостатньою швидкістю друку, і збільшується точність обладнання і процесу, що дає більшу свободу проектування виробів, зменшує об'єми пост-обробки та якнайповніше використовує властивості полімерів. В АРКТ такі кінцеві вироби більш широко використовуються саме в авіабудуванні через легкість полімерних виробів, точність форм та поверхонь, наявності спеціалізованих полімерів з високою міцністю, стійкістю до масел, нафтопродуктів та інших специфічних та агресивних речовин. Також, можливість друку одиничних деталей без великих затрат на технологічну підготовку має велику користь в умовах дрібносерійного та одиничного виробництва літальних апаратів, коли виробництво дорогого оснащення не буде економічно ефективним [5]. Це добре можна застосовувати в ремонтних роботах – для дрібного ремонту чи заміни зношених деталей, оригінали яких були виготовлені з полімерів литтям. Можливість друку деталей та виробів нетипових для традиційних видів виробництва форм надає великі можливості масової оптимізації топології виробів, зменшуючи масу конструкції без втрати експлуатаційних характеристик. Легка оброблюваність полімерів та можливість нанесення широкого спектру декоративних і функціональних покриттів також дає можливість оптимізації виробів та вузлів з точки зору аеродинаміки. Висока точність та міцність деталей дозволяє замінювати лиття під тиском для отримання деталей електромеханіки та систем контролю і керування. В ракетобудуванні полімерні друковані деталі також дозволяють замінювати вузли, які не потребують високих властивостей міцності чи температурної стійкості, через що виготовлення їх з традиційних металів чи литих полімерів виготовляє суттєво недонавантажену конструкцію. Так, FDM/FFF друком

можна виготовляти деталі внутрішнього оздоблення та обшивки салонів і герметичних відсіків авіаційної техніки, елементи систем кондиціонування, деталей для бортової електромережі, систем керування, корпуси електроніки та приборів, обтічники та зовнішні панелі у авіації [6]. У ракетній техніці друком з полімерів можуть бути виготовлені також елементи клапанної арматури, корпусні та монтажні деталі систем керування, деталі для вузлів пневогідравлічної системи, тощо [7]. Також, FDM/FFF друк за характеристиками деталей, що можуть бути їм отримані, в повній мірі задовольняє експлуатаційні вимоги, що присутні в ракетах геофізичного та метеорологічного призначення і в ракетах-носіях надлегкого класу. Корпусні деталі та елементи, які не мають високого теплового і силового навантаження (деталі двигунної установки, високонавантаженні корпуси), можуть бути в повній номенклатурі виготовлені методами пошарового синтезу, наприклад: аеродинамічні обтічники, корпуси відсіків електроніки, парашутні відсіки і відсіки корисного навантаження, елементи наземної інфраструктури на полігоні, тощо. Також виробництво безпілотних літальних апаратів і комплексів та деталей для них можливо в повному об'ємі реалізувати методами FDM/FFF синтезу [8].

SLA та DLP друк мають перевагу у набагато більшій точності, в порівнянні з FDM/FFF синтезом, оскільки їх точність та роздільна здатність залежить лише від роздільної здатності екрана матриці (для DLP) або точності позиціонування дзеркал системи джерела випромінювання (для SLA). Так, наприклад, точність в площині шару типового FDM/FFF 3D-принтеру знаходиться в діапазоні 0.1-0.15 мм., а мінімальна товщина шару стабільної точності – 0.1 мм. Це обумовлено точністю подачі матеріалу, діаметром сопла та точністю його переміщення. Для SLA чи DLP синтезу точність в площині шару залежить від розміру лазерної плями чи розміру пікселя матриці. Типовий для SLA розмір лазерної плями та точність її позиціонування – 0.085 та 0.025 мм. Розмір пікселя матриці DLP-принтеру 0.025-0.075 мм. Товщина шару для обох видів знаходиться в діапазоні 0.01-0.1 мм. Також, для полімерів,

які використовують для FDM/FFF синтезу, значною мірою наявна проблема усадження матеріалу при його охолодженні, що вносить розмірну похибку від час друку. Смоли, що використовуються для SLA чи DLP, мають значно менший коефіцієнт усадження, що також підвищує точність у порівнянні. Але дуже суттєвим недоліком синтезу з полімерних смол є їх значно менша ударна в'язкість та вища крихкість. Ці особливості синтезу з смол обумовлюють їх використання переважно для виготовлення зразків для випробувань в аеродинамічній трубі та майстер-моделей для лиття, де основними вимогами є точність форм та розмірів і якість поверхні.

1.2 Полімерні матеріали у пошаровому синтезі

Розглядаючи методи і види пошарового синтезу, варто зазначити, що у більшості з них є можливість використовувати широкий перелік матеріалів. Як було описано в попередньому розділі, відповідно до типів синтезу, матеріали можуть бути у виді прутка полімеру (інша поширена назва – філамент), у виді полімерного порошку або у виді полімерної фоточутливої смоли. Серед розглянутих методів синтезу, прутковий філамент використовується для FDM/FFF 3D-друку, порошкові полімери – у Binder Jetting технологіях, а смоли – у PolyJet, SLA та DLP.

Матеріали, що використовуються у виді філаменту, представлені різними термопластичними полімерами. Їх головна особливість, на відміну від термореактивних полімерів, в тому, що під час повторного нагріву матеріалу, полімер знов переходить в в'язкотекучий стан. Це дозволяє переробляти матеріали для вторинного використання чи для зміни їх форми використанням лише термічних методів впливу. Також це дозволяє використовувати будь-які методи формування полімеру при доведенні його до температури плавлення чи переходу в в'язкотекучий стан при температурі склування [9]. Ця особливість дозволяє використовувати для 3D-друку широкий перелік полімерів, що використовуються для традиційних методів формування, наприклад лиття під

тиском. Філамент у прутку найчастіше поставляють у вигляді бухт та мотків, зазвичай намотаних на катушки. Особливістю є те, що продаж йде на вагу філаменту, а не на довжину, найбільш поширені маси намотування – 0,75 кг., 0,85 кг., 1 кг. та 3 кг. Типові діаметри філаменту – 1,75 мм., що де-факто прийнятий за стандарт, та 2,85 мм.

Розглядаючи полімери для FDM/FFF 3D-друку, можна умовно поділити полімери на стандартні та інженерні. Інженерні філаменти ще називають високотемпературними, бо більшість інженерних філаментів мають більш високу температуру експлуатації, потребують нагріву сопла друкувальної головки вище 240 °C та закриту друкувальну камеру з можливістю підігріву [10].

Стандартні філаменти представлені такими видами, як PLA, ABS, coPET, MBS, SAN та HIPS.

PLA (полілактид, ПЛА) – один з найпопулярніших матеріалів для 3D-друку, являє собою полімеризовану полілактидну кислоту. Полілактид – біорозкладний полімер, що отриманий з біологічних відновлювальних ресурсів, таких як картопляний та кукурудзяний крохмаль, цукрова тростина та залишки після виробництва цукру. Полілактидний полімер дозволяє створювати габаритні вироби з високою стабільністю розмірів, високою геометричною складністю і високою роздільною здатністю друку. У цього матеріалу низька усадка та висока адгезія до платформи, що спрощує процес 3D-друку – цей філамент не потребує закритої камери для друку, спеціальних покриттів для платформи побудови чи високої температури її підігріву. Також цей матеріал має високу адгезію між шарами - це дозволяє друк без деламінації і деформації готового виробу. Але PLA має технологічні недоліки, а саме – погану в'язкотекучість, що обмежує швидкість друку. Також, не зважаючи на загально високу міжшарову адгезію, через погану текучість друк товстими шарами утруднений. Вироби мають красиву, глянцевою поверхню без необхідності додаткової обробки. PLA володіє високою жорсткістю і високою міцністю на розрив, проте він крихкий і погано піддається обробці

шліфуванням. PLA – напівкристалічний або аморфний полімер, з температурою склування 55 °C та плавлення 180 °C. Найвища температура експлуатації обмежена 50 °C. Через те, що PLA має біологічне походження, підвищена температура повітря та атмосферна вологість при використанні назовні призводять до більш швидкої деградації матеріалу [11].

ABS (акрилонітрил бутадієн стирол) – також один з найпоширеніших полімерів для 3D-друку. Свою популярність він знайшов завдяки таким властивостям, як простота механічної та хімічної обробки надрукованих виробів, широкий діапазон температур експлуатації, стійкість до впливу розчинів лугів і кислот, простоті фарбуванню і склеюванню. Вироби створені з ABS піддаються хімічній обробці за допомогою розчинників, таких як ацетон та етілацетат. ABS має малу крихкість, на відміну від PLA, у нього при руйнуванні явно виражена ділянка плинної деформації. Також на відміну від PLA, цей полімер має набагато складніші умови друку – закрита камера побудови, відсутність протягів та нерівномірного охолодження, складнощі з забезпеченням задовільної адгезії по платформи побудови, значна усадка та виділення токсичних випаровувань в процесі друку. ABS – аморфний полімер, без дійсної температури плавлення, з температурою склування 105 °C. Температура експлуатації – -20 - +80 °C. У виді готового виробу має малу чуттєвість до впливу зовнішніх умов [12].

Пластик соPET (PETG) – сополімер поліетилентерефталату, який одержують введенням у базовий полімер (поліетиленфталат) 1,4-біс гідроксиметил циклогексана (CHDM) або етилен гліколь. Його переваги у високій міцності та ударній міцності, по відношенню до PLA чи ABS. Він має меншу жорсткість, ніж PLA, але менш крихкий. соPET стійкий до водних розчинів солей, розбавлених кислот і лугів, аліфатичних вуглеводнів, спиртів. Має кращу за PLA оброблюваність шліфуванням. Має гіршу склеювальність. По умовам друку близький до PLA, не має явно вираженої токсичної дії при друкуванні, має високу міжшарову адгезію, малу усадку. Цей полімер також

аморфний, з температурою склування 70 °C. Температура експлуатації – -20 – +70 °C [13].

MBS (метилметакрилат-акрилонітрил-бутадієн-стирол) це співполімер, подібний до ABS, що складається з трьох мономерів: акрилонітрилу, бутадієну та стиrolу. Бутадієнова частина забезпечує гнучкість і високу ударну стійкість, тоді як частина метакрилат-стирол-акрилонітрил забезпечує міцність, стабільність розмірів. MBS без додавання барвників має коефіцієнт світлопропускання 90%, високу ударну в'язкість, високу жорсткість і хорошу стійкість до хімічних речовин – стійкий до кислот, луг, ароматичних вуглеводнів, спиртів. Розчиняється в ацетоні, тетрагідрофурані, за рахунок чого можлива хімічна обробка виробів. Має вимоги до друку подібні до ABS, але менш чутливий до нерівномірного охолодження. У порівнянні з ABS має кращу міжшарову адгезію. MBS, як і ABS – аморфний полімер, також не має дійсної температури плавлення. Температура склування MBS – 80 °C, що і є обмеженням температури експлуатації [14].

SAN (стирол-акрилонітрил) – співполімер, що складається зі стиrolу та акрилонітрилу. Завдяки високій термічній стійкості даний матеріал використовується замість акрилу, полістиролу, у 3D-друці може використовуватись як заміна ABS. SAN має високу жорсткість та твердість, проте має набагато меншу ударну в'язкість у порівнянні з іншими полімерами на основі акрилонітрилу. Має найвищий коефіцієнт світлопропускання серед усіх філаментів – 92%. Хімічно стійкий до лужних і кислих середовищ, стійкий до масел та ароматичних вуглеводнів. Завдяки високій твердості має мале зношування в умовах роботи у механізмах типу зубчастих передач, черв'ячних передач, кулачків, штовхачів і подібних. Також за рахунок малого коефіцієнту теплового розширення має меншу усадку, ніж ABS, менш вибагливий до умов друку. Легко оброблюється різанням, хімічною обробкою ацетоном, має добру склеюваність та добре фарбується. Температура склування – 100 °C, температура експлуатації – -40 °C - +80 °C, можливе функціонування деталей при короткочасному підвищенні температури до 105 °C [15].

HIPS (High-impact Polystyrene) – ударостійкий полістирол, аморфний полімер, що являє собою сумішевий сополімер полістиролу та полібутадієну або інших синтетичних каучуків. Збільшення вмісту каучуку збільшує ударостійкість матеріалу. Матеріал непрозорий, жорсткий, але стійкий до ударних впливів, до морозу і перепадів температур. Стійкість до ударних навантажень подібна до ABS полімеру. Розчиняється в лімонені – натуральному розчиннику, що одержують з цитрусових, завдяки чому його широко використовують для створення розчинних підтримуючих структур в 3D-друці. Також, за рахунок наявності каучуків, має високі діелектричні властивості, а саме – напруга пробою у приблизно 1 кВ. Стійкий до дії кислот та лугів, сумісний з харчовими продуктами. За рахунок меншої твердості, в порівнянні з PLA чи ABS, добре піддається механічній обробці. Практично відсутнє водопоглинання, стійкий до умов зовнішнього середовища. Температура плавлення – 230 °С, температура склування – 100 °С, температура експлуатації – -40 °С - +70 °С [16].

Основні характеристики вищерозглянутих стандартних філаментів наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Властивості стандартних філаментів

Полімер	PLA	ABS	coPET	MBS	SAN	HIPS
Межа міцності, МПа	50	38	50	30	71	30
Відносне подовження, %	30	30	24	50	3	30
Модуль пружності, ГПа	2,3	2,6	1,9	2,1	3,5	2,2
Ударна в'язкість по Шарпі без надрізу, кДж/м ²	102	196	179	-	4	120

Інженерні філаменти представлені такими видами, як PET, PC, Nylon, ASA, PEI, PEEK, PEKK.

Поліетилентерефталат (PET) — термопластик, найбільш поширений представник класу поліефірів. Продукт поліконденсації етиленгліколю з терефталевою кислотою (або її диметиловим ефіром). Полімер здатний бути у 2-х фазових станах – в аморфному і кристалічному. Твердий, безбарвний, прозорий пластик в аморфному стані, і білий, непрозорий в кристалічному стані (якщо не було додано барвників). Переходить в аморфний стан при нагріванні до температури склування і залишається в ньому при різкому охолодженні та швидкому проходженні через так звану «зону кристалізації». Одним із важливих параметрів ПЕТ є характеристична в'язкість обумовлена довжиною молекули полімеру. Зі збільшенням в'язкості швидкість кристалізації знижується. Для цього матеріалу характерна міцність, висока ударна в'язкість, висока зносостійкість в аморфному стані, стійкість до кислот, лугів, ультрафіолетового випромінювання. При друці PET пластиком спочатку вироби знаходяться в аморфному стані володіють високою ударною в'язкістю, високим подовженням при розриві й мають температуру експлуатації до 70 °C. Такі вироби можливо кристалізувати (загартувати), після чого вони мають температуру експлуатації до 200 °C (чим вищий ступінь кристалізації, тим вища температура експлуатації, але нижча ударна в'язкість). Процедура кристалізації полягає у повільному прогріві деталей до 180-200 °C, після чого деталь охолоджується природним чином без зовнішнього охолодження. Філамент високотемпературний, вимагає нагріву платформи побудови до 90-100 °C, нагрів друкувального сопла – 245-260 °C. Філамент потребує зберігання в вакуумному пакеті з поглиначом вологи через велике вологопоглинання [17].

Полікарбонат (PC) – лінійний поліефір вугільної кислоти H_2CO_3 та двохатомних спиртів. Відноситься до групи аморфних термопластів. При литті під тиском матеріал залишається аморфним. Кристалічна фаза в PC присутня в незначній кількості. Для кристалізації звичайного PC його необхідно витримати тривалий час (не менше 8 днів) при високій температурі (не менше 180 °C) або в ацетоні, а також кристалізується при надвисоких тисках лиття

(понад 500 МПа). Завдяки високій міцності й ударної в'язкості (250-500 кДж/м²) вироби з PC застосовуються в якості конструкційного матеріалу в різних галузях промисловості. При використанні в 3D-друку потребують закритої камери побудови, також є високотемпературними: підігрів друкувальної поверхні 90-110 °С, температура сопла друкувальної головки 250-255 °С. Має стійкість до кислот, спиртів, масел та ароматичних вуглеводнів. Має погану стійкість до лугів та ультрафіолетового випромінювання, для покращення стійкості до УФ використовуються лакофарбові покриття, плівки. Температура експлуатації – -40 – +120 °С. Вироби, виготовлені методом 3D-друку за рахунок шарованої структури витримують короткочасне нагрівання до 150 °С [18].

Nylon – представник сімейства поліамідів, також має назву поліамід-6. Завдяки високим механічним властивостям відноситься до конструкційних (інженерних) полімерних матеріалів. Nylon – жорсткий пластик, піддається кристалізації, володіє високою міцністю на розрив і стійкістю до зношування. Nylon відрізняється високою температурою розм'якшення та еластичністю при низьких температурах, витримує стерилізацію паром, розігрітим до 140°С. Ця властивість дозволяє використовувати його в умовах з температурними перепадами в широкому діапазоні, в умовах тривалого нагрівання температура експлуатації – не вище 120 °С. Nylon стійкий до впливу різних хімічно активних речовин — таких як слабкі кислоти, кетони, луги, вуглеводні, масла, спирти та ефіри. Деталі, виготовлені з Nylon, стійкі до ударних і статичних навантажень. Nylon може слугувати хорошим теплоізолятором. При використанні в 3D-друці потребує особливих умов зберігання та просушування перед друком через велике вологиопоглинання філаментом. Філамент вибагливий до умов друку, потребує закритої камери побудови через вологиопоглинання під час друку та чутливість до нерівномірного охолодження. При друкуванні на низьких швидкостях можливий перегрів полімеру з виникненням бульбашок на поверхні деталі. Полімер у нагрітому в'язкотекучому стані має велику в'язкість і текучість, що ускладнює друк

поверхонь на підтримках. Філамент від більшості виробників напівжорсткий, що може спричиняти труднощі у випадку системи подачі типу Bowden. Полімер має високий коефіцієнт температурного усадження, що погіршує розмірну точність деталей, потребує внесення допусків до розмірів моделі. При цьому, міжшарова адгезія висока, адгезія до платформи побудови не порушується, при підігріву її до 90-110 °C. Деталі, виготовлені з цього матеріалу, добре піддаються обробці різанням через невелику твердість поверхні, в той же час обробка шліфуванням ускладнена [19, 20].

ASA (акрилонітрил стирол акрилат) - матеріал розроблений для заміни ABS полімеру, з покращеною атмосферостійкістю і ударною міцністю. ASA значно більш стійкий до розтріскування під впливом агресивного середовища, в порівнянні з ABS, особливо стійкий до спиртів, багатьох засобів для очищення, мастил, розбавлених кислот, бензину, зберігає насичений колір протягом тривалого часу. ASA структурно дуже схожий на ABS. Акрилатний полімер відрізняється від полімеру на основі бутадієну відсутністю подвійних зв'язків, що надає матеріалу приблизно в десять разів більшу стійкість до атмосферних впливів та ультрафіолетового випромінювання, ніж ABS, вищу довготривалу термостійкість та кращу хімічну стійкість. ASA значно стійкіший до розтріскування під напругою в навколишньому середовищі, ніж ABS, особливо до спиртів та багатьох мийних засобів. ASA має нижчу температуру склування, ніж ABS, 100 °C проти 105 °C, що забезпечує кращі низькотемпературні властивості матеріалу. Він використовується в сферах застосування, що вимагають атмосферостійкості, наприклад, комерційний сайдинг, зовнішні частини транспортних засобів або вуличні меблі. ASA має невисоку деформаційну усадку та високу адгезію. ASA має помірне вологопоглинання, але у більшості випадків не потребує просушування перед друком. Для друку рекомендована закрыта камера побудови. Вироби з даного матеріалу легко піддаються різним способам постобробки: механічній (шліфування, свердління, токарні роботи), хімічній (надання глянцевої поверхні виробами за допомогою розчинників, аналогічно ABS), вироби з

даного матеріалу добре підходять під фарбування та покриттям лаком. ASA добре склеюється клеями ціаноакрильного типу, а також за допомогою розчинників, таких як циклогексан, діхлоретан, діхлорметан [21].

PEI (Полієфірімід, також відомий під торговою маркою Ultem) — це аморфний термопластик від бурштинового до прозорого кольору. PEI має температуру склування 217-220 °C. Він має високу стабільність механічних та електротехнічних властивостей в широкому діапазоні температур. Ці його особливості дозволяють використовувати його для виготовлення виробів для медичної сфери, бо до нього можна застосовувати стандартні методи стерилізації, як обробка паром в автоклавах. Високі діелектричні параметри дозволяють використовувати його для виробництва електричних компонентів, таких як корпуси роз'ємів, ізолятори. Має високу міцність, стійкість до кислот, лугів, спиртів, ароматичних вуглеводнів. Має високу стійкість до зношування, самозатухаючий, біологічно сумісний, стійкий до ультрафіолету. Недоліком є чутливість до тріщин, надрізів, достатньо низька ударна в'язкість. При використанні в 3D-друці потребує закритої камери побудови, підігріву камери до температури не менше 60 °C, високу температуру сопла друкувальної головки – 350 °C [22].

PEEK (полієфір ефір кетон) – органічний термопластичний полімер. Він має напівкристалічну структуру, характеризується високими властивостями міцності та хімічної стійкості в широкому діапазоні температур. Температура склування – 145 °C, температура плавлення – 345 °C. Має високі діелектричні показники, що зберігаються також на широкому проміжку температур експлуатації. Має високу стійкість до температурної, хімічної та біологічної деградації. Стійкий до кислотних, лужних середовищ, за виключенням галогенів та оцтової кислоти, стійкий до масел та ароматичних вуглеводнів. Через малу зношуваність та хімічну стійкість широко застосовується для виготовлення клапанної арматури, ущільнювальних кілець, також має використання у вакуумних технологіях. Біологічно сумісний, але за рахунок своїх гідрофобних властивостей не має повного зростання з кістками, що

дозволяє використання в медицині для імплантування. При використанні в 3D-друці потребує закритої камери побудови, підігріву камери до температури не менше 60 °С, високу температуру сопла друкувальної головки – 360 °С [23].

РЕКК (поліефір кетон кетон) – подібний до РЕЕК полімер, який має дещо вищу температуру склування - 162 °С. Він має дещо вищу міцність та стійкість до зношування. Також може підданий стерилізації паром та ультрафіолетом [24].

Основні механічні характеристик вищерозглянутих полімерів внесені в таблицю 1.2.

Таблиця 1.2 – Властивості інженерних полімерів.

Полімер	PET	PC	Nylon	ASA	PEI	РЕЕК	РЕКК
Межа міцності, МПа	70	68	78	47	95	116	81
Відносне подовження, %	50	6	75	15	50	15	5
Модуль пружності, ГПа	3	2,3	2,7	2,3	3,1	4,2	4
Ударна в'язкість по Шарпі без надрізу, кДж/м ²	-	350	-	18	-	-	-

1.3 Композиційні матеріали у пошаровому синтезі

З поширенням використання технологій пошарового синтезу виникає потреба у покращенні експлуатаційних характеристик виробів та збільшення можливостей заміни деталей, що були виготовлені традиційними методами на такі, що отримані методами пошарового синтезу. Основними експлуатаційними характеристиками, що важливі у АРКТ, є: міцність, мінімальна маса конструкції та стійкість до ударних і вібраційних навантажень. Міцність, тобто здатність супротиву механічним навантаженням, забезпечується фізико-механічними властивостями матеріалів. Мінімальна маса конструкції є поєднанням високих властивостей міцності матеріалу, його

малої питомої ваги та оптимальної форми і топології виробу. Стійкість до ударних і вібраційних навантажень також значною мірою визначається властивостями та структурою матеріалів.

Виходячи з особливостей використання та застосування матеріалів, зазначених у огляді раніше, у подальшому основна увага буде приділена способам покращення вищезазначених характеристик, в основному – міцності, в контексті до FDM/FFF технологій. Існують способи покращення характеристик матеріалів у готовому виробі, такі як термічна обробка, хімічне покриття та просочування та інші. Але основним і найбільш дієвим способом підвищення властивостей є додавання наповнювача у основний полімер, тобто утворення композиційного матеріалу [25]. Серед найбільш поширених видів наповнювачів можна виділити два – наповнення гранулами чи порошком та наповнення волокнами.

Наповнення порошком чи мікрогранулами можна розділити на декоративні і функціональні. Декоративні наповнювачі, такі як часточки дерев'яної стружки, мікрогранули мармуру, композицій для флуорисценції та інше не мають суттєвого впливу на експлуатаційні якості матеріалу. Серед функціональних порошків і гранул можна розглядати такі наповнювачі, як графітові чи скляні мікрогранули і металеві порошки. Призначення мікрогранул – покращення властивостей поверхні матеріалу, а саме – твердості, зносостійкості чи надання матеріалу певних (анти)фрикційних властивостей. Металеві порошки в основному використовуються для модифікації властивостей теплопровідності чи теплоємності полімерів, надання їм магнітних або струмопровідних властивостей.

Наповнення волокном відноситься до функціонального наповнення [26, 27]. Волокно може бути рублене, коротке та довге. Найбільш популярні волокна наповнення – скляне волокно, арамідне, базальтове, вуглецеве, тощо. Крім довжини і матеріалу волокна, важливий параметр – відсоток наповнення. Чим більше частка наповнення волокном у об'ємі полімеру, тим більша результуючі фізико-механічні показники кінцевого виробу, але філаменти з

високим відсотком наповнення мають певні технологічні складності друку, такі як сильне зношування сопла та подавальних механізмів, поганий прогрів у соплі та висока умовна в'язкість. Це все обмежує швидкість друку, накладає обмеження на мінімальний діаметр сопла.

Порівнюючи наповнення рубленими та короткими волокнами з наповненням довгими волокнами, останнє надає найбільшу прибавку до механічних властивостей деталі. Короткі волокна мають здатність до орієнтації вздовж напрямку руху друкувального сопла, що частково споріднює структуру матеріалу, що отриманий таким способом, з композиційним матеріалом отриманим традиційними методами викладки та формування. Але рублені та короткі волокна надають в основному місцеву прибавку міцності і твердості матеріалу, так як розподілення зусиль у виробі в межах всього виробу передається між волокнами за рахунок основного полімеру.

Найбільш перспективним і ефективним серед способів наповнення вважається наповнення неперервними волокнами. Воно дозволяє розподіляти більшу частину навантаження та напружень в деталі саме на волокно наповнювача, тоді як основному полімеру відводиться роль зв'язуючого компонента. Такий спосіб наповнення найбільш наближує деталі, отримані пошаровим синтезом, до деталей з композиційних матеріалів виготовлених традиційними методами формування, такими як викладка. Можна також зазначити, що таке наповнення, якщо воно має за мету покращення властивостей виробу, називають також армуванням. Схеми основних методів армування наведені на рис. 1.5 [28].

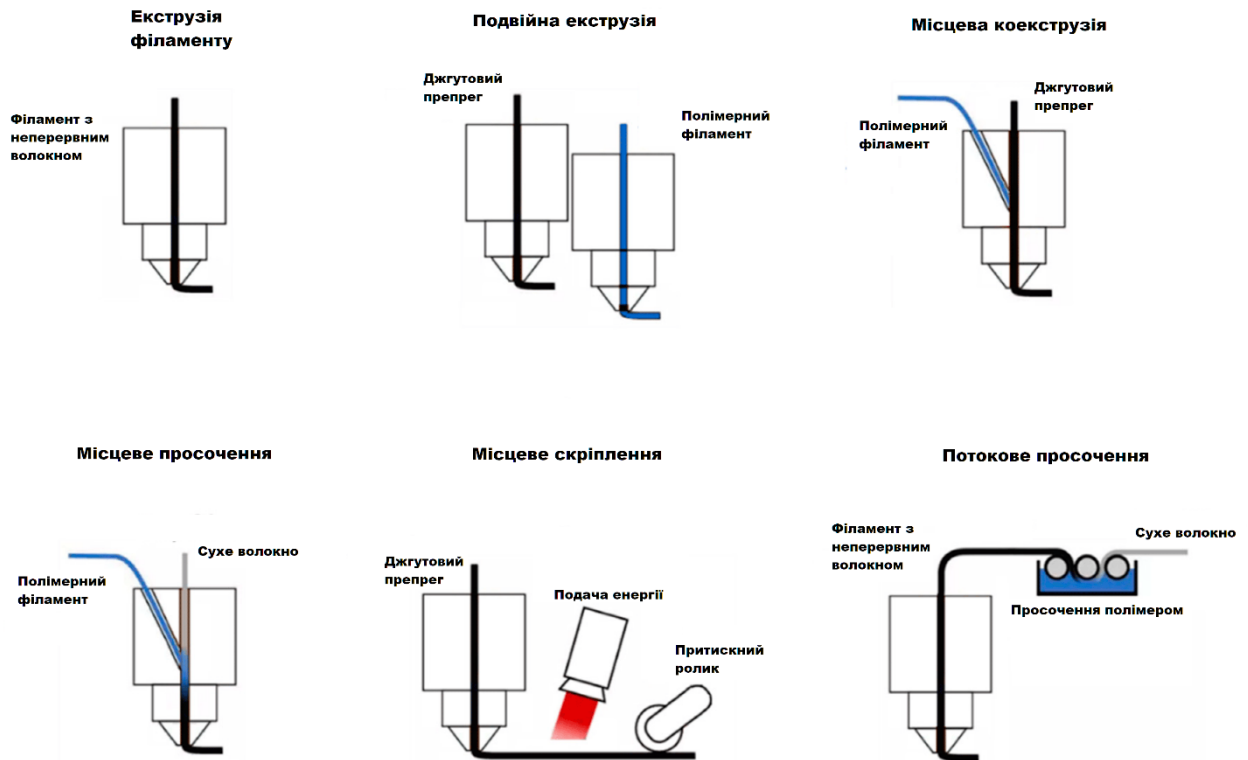


Рисунок 1.5 – Основні методи армування волокном в процесі 3D-друку

Екструзія філаменту використовує стандартний алгоритм роботи 3D-принтеру, оскільки з точки зору процесу синтезу немає ніяких змін у порівнянні з використанням полімерного філаменту без наповнювача. У такому методі використовується філамент з наповненням мікрогранулами, порошками, рубленими чи короткими волокнами. На момент синтезу філамент вже знаходиться в готовому для використання виді [29].

Подвійна екструзія використовує дві окремі друкувальні головки, однією виконується викладання основного полімеру, а іншою – препрегу армуючого волокна. Цей метод має більшу складність механічно і алгоритмічно, але дозволяє виконувати армування дискретно, а не по всьому об'єму шару.

Місцева коекструзія – основний полімер та волокно товпрегу подається в спільну друкувальну головку, після змішування отриманий армований полімер викладається. В залежності від технологічного виконання, полімер оброблення препрегу може бути термопластичний або термореактивний [30].

Метод місцевого просочування полягає в тому, що в друкувальну головку подається необроблене волокно і основний полімер, просочення волокна відбувається безпосередньо перед викладанням отриманого наповненого полімеру друкувальною головкою. Цей метод дозволяє налаштовувати співвідношення наповнювача до основного полімеру місцево і безпосередньо в процесі синтезу [31].

Місцеве скріплення є аналогом автоматичного викладання волокна, де використовується полімерно-волокнистий препрег, а друкувальна головка, що його викладає, має в своєму складі притискний ролик та джерело нагріву, завдяки чому виконується скріплення ліній препрегу в площині шару і між шарами.

Потокове просочування – найскладніший з процесів, який включає в себе приготування наповненого волокном полімерного філаменту як частину установки для пошарового синтезу. Необроблене волокно просочується полімером у окремому вузлу принтеру. Цей метод дає можливість найбільшого налаштування параметрів матеріалу, але через велику кількість процесів, що виконуються одночасно, оптимізація ускладнена.

Переваги та недоліки методів наповнення викладені в табл. 1.3 [32, 33, 34].

Таблиця 1.3 – Переваги та недоліки основних методів армування

Метод	Переваги	Недоліки
Екструзія філаменту з волокном	Мінімальні зміни до конструкції принтеру, простота керування процесом	Неможливість вибіркового армування чи зміни відношення матриця/наповнювач
Подвійна екструзія	Можливість вибіркового армування, незалежність	Складність системи керування та зміні

	систем подачі компонентів	інструменту, перервність волокна
Місцева коекструзія	Незалежність об'єму подачі компонентів, широкий вибір компонентів	Неможливість вибіркового армування, висока складність контролю змішування
Місьцеве просочення	Незалежність об'єму подачі компонентів, широкий вибір компонентів, відсутність домішок у кінцевому матеріалі	Неможливість вибіркового армування, складність подання волокна та контролю процесу просочення, значна пористість матеріалу
Місьцеве скріплення	Висока щільність деталей, можливість великих швидкостей та об'ємів друку	Неможливість вибіркового армування чи використання окремої полімерної матриці, низька точність
Потокове просочування	Найкраща налаштовуваність параметрів друкувального матеріалу	Неможливість вибіркового армування, складність процесу та обладнання

1.4 Визначення напрямків та завдань дисертаційного дослідження

Виходячи з проведеного аналізу, основними недоліками поширених процесів є: неможливість вибіркового армування виробу в межах шару, недотримання неперервності волокна в межах шару та наявність домішок від матеріалу обробки препрегу. Неможливість вибіркового армування зменшує можливості оптимізації схеми армування відповідно до навантажень і напружень на виріб і обмежує можливості оптимізації ваги конструкції. Недотримання неперервності волокна створює локальні концентратори

напружень, прогнозування яких при розрахунку виробу ускладнено або неможливо. Наявність домішок у кінцевому матеріалі полімерного композиту ускладнює прогнозування і розрахунок параметрів виробу, ускладнює контроль і дослідження якості зчеплення волокну та основного полімеру.

Відповідно до результатів аналізу, в ході дослідження необхідно виконати наступні задачі:

- дослідити вплив технологічних параметрів на експлуатаційні властивості виробів з полімерних композиційних матеріалів, що отримані методами пошарового синтезу;
- обґрунтувати вибір матеріалів матриці та армуючих елементів;
- розробити раціональні схеми і режими отримання виробів з полімерних композиційних матеріалів з використанням методу 3D-друку;
- розробити конструкцію і виготовити технологічне оснащення;
- дослідити вплив параметрів 3D-друку на структуру і властивості отриманого матеріалу;
- провести моделювання композиційного матеріалу і виробу з урахуванням реальних умов експлуатації.

2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ. РОЗРОБКА МЕТОДУ АРМУВАННЯ

2.1 Матеріали, які використовувались у дослідженні

Розглянувши основні види матеріалів, що використовуються для 3D-друку, прийнято рішення використовувати стандартні філаменти. Не зважаючи на те, що інженерні полімери мають більш високі властивості міцності та більш високі межі температури експлуатації, вони малопридатні для дослідження з технологічних причин. Це обумовлено їх більш високими вимогами для друку, в першу чергу – потреба в закритій камері побудови та висока температура сопла друкувальної головки. Це унеможливило використання методів армування, які передбачають будь-які маніпуляції з деталлю, волокном чи будь-яким обладнанням, що розміщене в камері побудови. Використання сопла з більш високою температурою також обмежує кінематичні системи та конструкції 3D-принтерів, що можуть бути використані для проведення дослідження і на яких можна буде використовувати розроблений метод армування.

Також, виходячи з більш вимогливих умов друку, включення волокна в склад матеріалу та структуру виробу може призводити до значного погіршення характеристик готового виробу. Фізична присутність волокна створює додаткові пори у матеріалі полімеру, а наявність малих волокон кімнатної температури в контакті з полімером, нагрітим до високої температури, призводить до нерівномірного охолодження полімеру в процесі друку [35]. Через це погіршується міжшарова адгезія, особливо враховуючи більший градієнт температури в порівнянні з стандартними полімерами (240 °C проти 350-380 °C). Також, при використанні волокна збільшуються технологічні вимоги до нього. Волокно повинно бути більш просушене, через велике водопоглинання інженерних полімерів і небезпеки утворення бульбашок через більш високий градієнт нагріву будь-яких залишкових рідин

чи вологи. Також, будь-яке хімічне покриття волокна, що може хімічно реагувати з нагрітим полімером, повинно бути видалено більш ретельно в порівнянні з підготовкою для його використання з стандартними полімерами, що мають меншу температуру друку.

До стандартних полімерів, що були розглянуті, були представлені вимоги по якійсній міжшаровій адгезії та малого коефіцієнту розмірної теплової усадки. Якість міжшарової адгезії важлива для зменшення впливу волокна на міцність зчеплення основного полімеру та для забезпечення задовільного зчеплення полімеру та волокна. Малий коефіцієнт усадки важливий для більш повного зчеплення полімеру та волокна, розмірної стабільності деталей [36].

Серед розглянутих стандартних філаментів таким умовам відповідають PLA та coPET. Вони мають низьку температурну усадку, якісну адгезію між шарами. Також ці обидва полімери не мають вимог до закритої камери побудови, малочутливі до впливу нерівномірного охолодження. Але через меншу текучість PLA, в дослідженні був використаний coPET.

Поліетилентерефталат співполімер (coPET, PETG) – полімер, який одержують введенням до складу базового полімеру (ПЕТФ, PET) 1,4-біс гідроксиметил циклогексана (CHDM). coPET це аморфний матеріал з гладкою глянцевою поверхнею, що відрізняється високою прозорістю і рівномірним світлорозсіюванням, вогнестійкістю, відсутністю в складі шкідливих компонентів, підвищеною стійкістю до ударів, хімічною стійкістю – стійкий до дії води й водних розчинів солей, розбавлених кислот і лугів, аліфатичних вуглеводнів, рослинних і тваринних масел та жирів. Має високу розмірну стабільність – коефіцієнт усадки при 3D-друку з рекомендованими температурами друкувальної головки та нагріву платформи побудови та за відсутності протягів не перевищує 1-1.2%.

Для використання в якості волокон армування розглядались три типи волокна – скловолокно, вуглецеве волокно та базальтове волокно [36, 37].

Скловолокно широко застосовується для створення композитів з високими експлуатаційними властивостями. Вони вирізняються великою

міцністю. Скловолокно має тетраедричну структуру, що складається переважно з кремнезему (SiO_2) (SiO_4). У багатьох фракціях для пришвидшення обробки або зміни певних властивостей додаються оксиди алюмінію, що містять різні іони металів. Скловолокно має слабку стійкість до стирання та середній модуль пружності, менш еластичні, ніж вуглецеві або арамідні волокна (приблизно 70 ГПа). Крім того, вони мають сильну схильність до слизького прокручування та слабку стійкість до втоми. Волокна піддаються процедурам калібрування з використанням відповідних матеріалів для стимулювання адгезії між волокнами та матрицею, а також для захисту волокон від впливу лужних агентів та вологи. Ці обробки значно покращують довговічність та стійкість композитного матеріалу до втоми (статичної та динамічної). Завдяки своїм видатним ізоляційним властивостям, високій міцності на розрив та хімічній стійкості, скловолокно є матеріалом з широким вжитком, що використовується для зміцнення структури термопластичних полімерів [38]. Завдяки своїм видатним ізоляційним властивостям, високій міцності на розрив та хімічній стійкості, скловолокно є популярним матеріалом, що використовується для зміцнення структури термопластичних полімерів. Скловолокно буває різних складів [39, 40, 41]. Перевагами скловолокна є розмірна стабільність, висока питома міцність на розтяг [42], висока вогнетривкість та мале вологопоглинання. Але недоліками скловолокна є ламкість, яка ускладнює ручне укладання окремих джгутів чи ниток та необхідність просочування полімером під тиском, що важко в достатньому об'ємі реалізувати методом 3D-друку.

Вуглецеві волокна розглядаються як вид матеріалів з високою міцністю [43], які в основному використовуються як наповнювач в композитних матеріалах [44]. Вуглецеві волокна мають найвищу еластичність та питому міцність порівняно з іншими волокнами, що використовуються як армування, такими як скляні волокна. Ці волокна також не піддаються корозії під навантаженням за кімнатної температури. Використання вуглецевого волокна дозволяє створити високоефективний матеріал, який більш ніж на 50% легший

за високоміцну сталь порівняно з іншими армованими волокнами, такими як скляні та полімерні волокна. Вуглецеві волокнисто-армовані композити підходять для застосувань, де важливими критеріями є міцність, жорсткість, низька маса та стійкість до втоми [45]. Структурна орієнтація волокнистого стрижня має значний вплив на характеристики вуглецевих волокон. Переваги вуглецевих волокон включають їх низьку щільність, високий модуль пружності та стійкість до сил розтягування та стискання, а також низький коефіцієнт теплового розширення, термостійкість за відсутності кисню при температурах вище 3000 °C, видатну стійкість до деформації, хімічну стабільність (особливо у кислотах), біосумісність. Вуглецево-армовані композити потребують відповідного прекурсора з високою молекулярною масою та високою молекулярною орієнтацією. Наразі віскоза, поліакрилонітрил (PAN) та рідкий та ізотропний дьоготь є трьома різними матеріалами-прекурсорами для створення вуглецевих волокон. Більшість вуглецевих волокон утворюються шляхом карбонізації PAN, яка складається з пучка фібрил з базальними площинами, що зазвичай вирівнюються вздовж усієї осі волокна та надають внутрішній структурі, подібній до лушпиння цибулі. Вуглецеві волокна мають модуль пружності, який коливається від 200 до 750 ГПа перпендикулярно до їхньої поздовжньої осі та близько 20 ГПа перпендикулярно до їхньої поздовжньої осі [46]. Кристалічна мезофазна рідка смола може створювати волокна з надвисоким модулем пружності; високий ступінь орієнтації попередника передається карбонізованим волокнам, утворюючи більші за розміром та краще орієнтовані кристали графіту. Високо анізотропне розташування ланцюгів, яке призводить до утворення волокон, пояснює їх виняткові тягові здібності. Молекули виконують більшу частину роботи в цьому напрямку, тоді як слабкі зв'язки Ван-дер-Ваальса виконують основну частину зусиль у поперечному напрямку. Подібно до того, як він погано поводить себе під час витягування, вуглець також погано поводить себе під час стискання. Недоліками вуглецевих волокон також є їх ламкість та складність забезпечування просочування при малих тисках. Ламкість

вуглецевого волокна може призводити до його розтріскування та утворень мікротріщин під час його взаємодії з соплом друкувальної головки, через що важливим є контроль достатнього покриття волокна полімером при виробництві філаменту з волокном для армування методом екструзії з волокном.

Базальтові волокна привернуло увагу як потенційно нова форма волокна для промисловості композитів [47]. Це нитки базальту, найпоширенішої породи в земній корі та основного компонента океанічного дна. Вони є добрими тепло- та акустичними ізоляторами, зберігають високотемпературні механічні властивості та хімічно стабільні [48]. Базальти містять кремній, алюміній, кальцій, магній, залізо та, меншою мірою, інші елементарні оксиди [49]. Таким чином, виробник та пропорції, в яких різні базальтові породи розчиняються всередині одного веретена, визначають точний хімічний склад базальтового волокна. Вони в основному використовуються для створення високоефективних бетонних заповнювачів, мінеральної вати та артефактів, стійких до хімічних речовин. У полімерних композиційних матеріалах базальтове волокно є перевагою, оскільки воно створюється шляхом сплавлення різних типів сировини та має кращі показники, ніж інші волокна, щодо термостійкості, тепло- та звукоізоляційних якостей, довговічності та вібростійкості. Поряд з вуглецевими та скловолокнами, воно також містить делікатні нитки, які класифікуються як мінеральні волокна. Тим не менш, вони перевершують їх механічні та хіміко-фізичні якості. Ці якості дозволяють композитам, армованим базальтовим волокном, бути чудовою заміною композитів, армованих скловолокном та вуглецевим волокном, оскільки вони однаково дорогі, жорсткі та мають чудові властивості корозійної та вогнестійкості [50, 51, 52]. Їх перевагами є більша еластичність в натуральному вигляді у широкому діапазоні щільностей, відсутність утворення мікротріщин від маніпуляцій з волокном та мала потреба в специфічному опретуванні [53]. Недолік базальтового волокна в його великій

питомій вазі та низькій варіативності властивостей в залежності від складу, на відміну від скловолокна та вуглецевих волокон.

Відповідно до аналізу матеріалів і їх переваг, подальші етапи дослідження проводились з використанням базальтового волокна. Щільність волокна, що застосовувалось – 80 текс. Для підготування волокна необхідно його очищення та зняття опрєтування. Це проводилось протиранням волокна ізопропиловим спиртом та просушкою.

Властивості матеріалів наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Властивості основного полімеру та наповнювача

Параметр	соРЕТ	Базальтове волокно
Міцність на розтяг, МПа	50	3500
Модуль пружності, ГПа	1,9	85
Коефіцієнт Пуассона	0,41	0,3
Відносне видовження при розриві, %	24	3,1
Температура експлуатації, °С	-20 - +80	-260 - +500

2.2 Структура та схема розробленого методу армування

Виходячи з основних недоліків, вказаних в попередньому розділі, необхідно розробити метод армування, що усуває їх. Головними недоліками, що необхідно усунути, були прийняті недотримання неперервності волокна наповнення і створення неспрогнозованих концентраторів напружень. Також, для мінімізації впливу матеріалу оброблення волокна у випадку використання препрегу, додатковим завданням є пріоритет використання необробленого волокна для наповнення [54].

Деякі з розглянутих методів армування забезпечують часткову неперервність волокна наповнення в межах одного шару, але наявність моментів зміни друкувальної головки (у випадку подвійної екструзії) або

переривання волокна для холостих ходів переміщення друкувальної головки не зберігають неперервності волокна. Крім того, наявність прогалин волокна і точок ненаповненого полімеру також створює концентратори напружень і місця локального послаблення [55]. Також, за рахунок збереження неперервності волокна в одному чи декількох напрямках можливо створювати задану, прогнозовану ортотропію механічних властивостей кінцевого матеріалу виробу. Це дозволить оптимізувати топологію виробів з урахуванням напрямку дії сил та навантажень на них. Така ортотропія властивостей повинна задаватись лише напрямленнями волокну та щільністю армування або відстанню між волокнами в шару.

Крім збереження суцільності волокна в межах одного шару, важливим є збереження суцільності і між шарами. Хоча це і не має суттєвого впливу на механічні властивості в напрямку армування, це дозволяє мінімізувати дефекти, пов'язані з закріпленням волокна наповнення біля меж шару. Також, наявність міжшарового зв'язку покращує міцність до навантажень здвигу.

Окрім збереження суцільності волокна, важливим вважається контроль положення волокна в площі шару. Це також дає можливість контролювати ортотропію властивостей матеріалу та дотримуватись співпадіння напрямку армування з напрямками дії навантажень [56]. Контроль положення одиничних волокон дає можливість найбільш широкого налаштування вибіркового армування виробу, що важливо для виробів з складною зміною геометрії в площинах шарів. Контроль положення в процесі пошарового синтезу здійснюється за допомогою технологічного обладнання, що повинно виконувати функції розміщення і напрямлення одиничних волокон відносно положення виробу на друкувальній поверхні та утримування їх в певному положенні відносно шару в процесі друкування [57, 58]. Утримання здійснюється не лише завдяки захватним і утримуючим деталям, а й за допомогою натягу. Натяг волокна необхідний для попередження його зсуву під час друку шару через рух друкувальної головки.

Розглядаючи вищезазначені особливості, розроблено метод армування прокладанням волокна. Метод армування розроблений на основі принципу забезпечення суцільності волокна. По результатам аналізу існуючих методів, у якості армуючих елементів обрані одиничні джгути чи пучки волокон, що можливо розміщувати у певному положенні. Як вказано в [59, 60], орієнтація волокон відіграє головну роль в розподіленні навантаження та використанні властивостей міцності волокна армування у загальній міцності виробу. Відповідно, використання джгутів чи пучків суцільного волокна забезпечує найбільше збереження властивостей волокна, у порівнянні з використанням дискретних волокон, та дозволяє використовувати волокно найбільш повно для підсилення виробу [61]. Також, використання прямого прокладання спрощує технологію виконання армування для отримання виробів з полімерних композиційних матеріалів через те, що перерозподілення навантаження та напружень на волокно в виробі відбувається в межах пружної деформації основного полімеру.

Сутність розробленого методу армування полягає в тому, що одиничні волокна або джгути композиційного волокна прокладаються між шарами деталі безпосередньо в процесі 3D-друку. Суцільність волокна зберігається при переході на наступний шар наповнення. При підготовці моделі до друку в залежності від заданої щільності укладання ниток або джгутів волокна та розмірів деталі розраховується необхідна довжина та кількість окремих ниток або джгутів волокна, виконується нарізка волокна. Перед початком друку за допомогою технологічного обладнання, попередньо встановленого на 3D-принтер, вільні кінці початку волокон або джгутів армуючого волокна закріплюють в початковому положенні. Ці кінці залишаються закріпленими до завершення друку. Друк визначеної кількості початкових шарів виконується без накладання волокна для формування оболонки та правильної геометрії основи, на яку буде накладений перший шар армуючого матеріалу. Після завершення друку початкових шарів та друку кожного шару, після якого передбачено накладання армування, процес друку ставиться на паузу, під час

якої виконується прокладання армуючого волокна. Це здійснюється за допомогою технологічного обладнання – накладання композиційних волокон, фіксація утримуючих деталей обладнання, натягування та за необхідності вирівнювання одиничних волокон чи джгутів наповнювача. Після прокладання армуючого матеріалу його зчеплення виконується друкуванням наступного шару полімеру поверх шару волокна, що забезпечує механічний зв'язок. При друкуванні закріплюючого шару необхідно стежити за тим, щоб волокна чи джгути армуючого матеріалу були гарантовано покриті полімером для надійного механічного зв'язку. Варто зазначити, що хоча отримана структура вважається полімерним композиційним матеріалом, зв'язок між основним полімером та волокном відбувається лише фізично, тому будь-якими хімічними процесами, що можуть виникати при температурах друку та враховуючи хімічні властивості більшості пар полімер-наповнювач, можна знехтувати.

Після закріплення кожного шару армуючого волокна не виконується обрізання матеріалу армування. При переході на наступний шар армування натяг волокна послаблюється та за допомогою рухомих утримуючих частин обладнання здійснюється перевертання всього набору волокон армування з натягуванням у іншу сторону. Така зміна напрямку укладки волокон армування у протилежні сторони зберігається упродовж всього процесу друку деталі, утворюючи вісь армування.



Рисунок 2.1 – Модель структури розробленого методу армування, вид збоку і з торця (сірий – основний полімер, жовтий – волокно)

Модель структури, показана на рис. 2.1, є прикладом схеми армування, за якої волокно прокладається після кожного надрукованого шару. У випадку, якщо так визначено схемою армування для конкретного виробу, прокладання волокна можливо виконувати з проміжком в один чи більше шарів.

Варто зазначити, що умови 3D-друку і технологічні параметри пошарового синтезу повинні передбачати надійне задруковування волокна наповнювача. Швидкість друку і температура нагріву сопла повинна забезпечувати оптимальне розплавлення полімеру для недопущення міжшарової деламінації. Також, при наявності переміщень холостого ходу, в керуючу програму необхідно вносити поправки для додаткової подачі полімеру в сопло перед основним рухом. Це потрібно для гарантованої суцільності потоку пластику при закріпленні волокна наповнювача.

Модель структури (рис. 2.1) сама по собі передбачає однонаправлене [62] армування виробів, що не мають отворів або вирізів у площині шарів. При їх наявності схему армування (розташування одиничних волокон) бажано розраховувати так, щоб отвори чи вирізи не перекривались волокном [63]. У випадку, коли необхідно армування через отвори та вирізи, виконується обведення волокна навколо вирізу чи отвору на етапі накладання комплекту волокна, до натягування волокон. Обведення волокна виконується вручну, з тимчасовим закріпленням волокна за допомогою клею. В рамках розробленого методу армування запропоновано використання клеїв на основі акрилату чи цианоакрилату [64, 65]. Закріплення волокна виконується так, щоб забезпечити розташування точок закріплення в межах побудови периметрів друкованого шару, для закріплення волокна наповнювача не тільки за рахунок клею, а і задруковуванням наступним шаром полімеру. Варто зазначити, що під час нанесення клею не допускається створення плям та затверділих ділянок/точок клею в межах шару, якщо це призведе до напінання на них

друкувального сопла при друці наступних шарів. Після виконання клейового закріплення волокон необхідно перевіряти натяг і положення волокна для недопущення втрати натягу чи суттєвого відхилення напрямку волокна від паралельності з віссю армування [66].

2.3 Методи дослідження пошарово наповнених полімерних композиційних матеріалів

Окрім методів виробництва деталей та вибору матеріалів, важлива частина життєвого циклу деталі – контроль якості. Існують руйнівні та неруйнівні типи контролю, і неруйнівні повинні передувати руйнівним. Неруйнівні методи контролю дозволяють отримати достатньо інформації для визначення відповідності виробу вимогам. Дослідження руйнівними методами потрібно проводити лише тоді, коли механічні параметри матеріалу не були попередньо встановлені чи не надані постачальником матеріалу, з якого виготовляється виріб [67]. Також руйнівні дослідження необхідні для визначення фізико-механічних характеристик готових деталей при розробці нових технологій синтезу ПКМ та використанню нових матеріалів.

В процесі адитивного виробництва з полімерних матеріалів найчастіше використовують методи контролю, подібні до таких, що застосовують для полімерних та композиційних матеріалів, отриманих традиційними способами виробництва.

Методи руйнівного контролю поділяються по типу контрольованого параметру. Основні методи поділяються на: статичне розтягування, статичний вигин, ударний вигин (на зразках з надрізом).

Методами статичного розтягування визначаються такі параметри, як межа пропорційності, межа пружності, межа плинності, межа міцності та відносне подовження. У цих методах використовують розривні машини, випробування матеріалу проводять на зразках спеціальної геометрії, що описана у відповідних стандартах [68].

Методами статичного вигину визначаються такі параметри, як кут вигину, та для уточнення модулю пружності. У цих методах використовують пресові машини з пристосуваннями типу пристрій для згинання з двома опорами і оправкою, пристрій для згинання з V-подібного опорою і оправкою та пристрій для згинання з лещатами [68].

Методами ударного вигину визначають ударну в'язкість. У цих методах використовується маятниковий копер.

Методи неруйнівного контролю поділяються за видом фізичних принципів, за рахунок яких здійснюється контроль. Основні методи контролю, які застосовуються до полімерних композиційних матеріалів, поділяються на: візуальний, акустичний, радіографічний, ультразвуковий та імпеданс-ультразвуковий [70, 71].

Візуальні методи контролю включають в себе огляди неозброєним оком, вимірювання розмірів, застосування оглядових та вимірювальних мікроскопів. Також до візуальних методів відносять методи підготовки поверхні до контролю.

Акустичні методи контролю включають в себе ручні та автоматичні ударно-акустичні дослідження [72] (так званий «coin tap test») та термо-акустично емісійні дослідження.

Радіографічні методи дослідження поділяються на нейтронну, рентгенівську та гамма рентгенографію [73, 74].

Ультразвукові методи [75] дослідження використовують ультразвукові хвилі та поділяються на методи проходженого випромінювання та методи відбитого випромінювання. Імпеданс методи є підвидом ультразвукових та полягають у реєстрації резонансу деталі при впливі високочастотних вібрацій.

Особливість контролю якості таких виробів полягає в тому, що для застосування методів адитивних технологій виробництва, а саме – FDM/FFF 3D-друк, характерно утворення багатошарової, гетерогенної структури, розташування елементів в якій сильно залежить від режимів друку [76]. Навіть при використанні однакових режимів друку однакові матеріали від різних

постачальників або партій можуть впливати на вигляд та геометрію структур. Такі особливості ускладнюють контроль виробів тому, що заважають відрізнити дефекти від особливостей генерації структур. Режими друку також впливають на точність виявлення дефектів, через можливу складність вимірювання технологічно обумовлених структур та розмірів. Також, на відміну від традиційних композитних матеріалів, де щільність та пористість шарів можуть змінюватися в залежності від розташування шарів, кількості зв'язуючої речовини та стратегії її нанесення, FDM/FFF 3D-друк утворює майже монолітні стінки та структури у місцях проходження простінків заповнення. Інша проблема – наявність технологічних пор та порожнин при друкуванні з щільністю заповнення менше 100%, що потребує створення «карт» простінків заповнення та врахування розташування ущільнення шарів у місцях закруглень та фасок.

Наявність армуючого волокна в пластику також накладає певні обмеження на методи контролю якості виробів, що використовуються. Через технологічні особливості FDM/FFF 3D-друку, положення армуючого волокна в одиничній нитці, що викладається через сопло, може не відповідати положенню волокна на попередніх шарах, що може бути сприйнято як хибно позитивний показник тріщини. Також, позиція волокна в вихідному філаменті, що подається в сопло, також може бути непостійна по довжині. Сума цих двох факторів може ускладнювати інтерпретацію показників вимірювальних пристроїв.

З урахуванням особливостей деталей, виготовлених методом FDM/FFF 3D-друку та особливостей, які накладаються наявністю армуючого волокна в пластику, наведені раніше методи контролю будуть розглядатись в контексті відповідності обом наборам чинників. Також будуть розглянуті різні варіанти орієнтації шарів деталі відносно контрольного пристрою.

Випробування на розтяг можливо для деталей-зразків різних розмірів та конфігурацій, але найчастіше використовуються моделі, відповідні стандартам тестування для металів. При цьому варто враховувати, що зразки

для випробування виготовляються одразу в тому виді, який буде встановлюватись в розривну машину. Ця відмінність, в порівнянні з методом отримання зразків з металів або ПКМ виготовлених методом викладки чи формування, пов'язана з тим, що розрізання або порушення структури виробу призводить до втрати міцності, локально чи загалом по виробу. Це особливо важливо при випробуваннях виробів, армованих неперервним волокном, бо це порушує його суцільність.

Слід враховувати, що міцність матеріалу та міцність кожної окремої деталі, виготовленої за допомогою FDM/FFF 3D-друку, відрізняються [77]. Міцність на розтяг залежить від технологічних параметрів друку, такі як температура нагріву друкувального сопла чи орієнтація шарів, щільність заповнення. Крім того, на міцність також впливає малюнок заповнення, товщина оболонки, якість з'єднання заповнення з оболонкою та ступінь перекриття оболонки заповненням [78]. Враховуючи наявність армуючого волокна в деталях, при випробуваннях на розтяг може відбуватися руйнування за декількома механізмами. Оскільки більшість полімерів, що мають використання у FDM/FFF 3D-друці, мають модуль пружності (модуль Юнга) набагато менший, ніж волокна для армування, то деформації що виникають під час навантаження у полімері відповідно більші. Через це перший механізм руйнування – руйнування полімеру під час розриву волокон армування в товщі основного матеріалу. За цього механізму зчеплення полімеру з волокном зберігається. Це свідчить, що в такому випадку межа міцності виробу забезпечується переважно міцністю волокна. Другий механізм руйнування, відповідно – руйнування основного полімерного матеріалу при його витягуванням волокна з полімерної матриці, з зберіганням цілісності волокна. Це свідчить про те, що в такому випадку межею міцності виробу є межа міцності скріплення основного полімеру з армуючим волокном [79].

Випробування на ударну в'язкість [80] можна проводити на деталях різної орієнтації шарів. Слід враховувати, що при деяких орієнтаціях шарів можливе локальне підсилення та ущільнення шарів у місці попередньо

змодельованого надрізу. Коефіцієнт ефективного армування нижче через наявність надрізу, що спричиняє більшу асиметричність руйнації зразку.

Випробування на згин виконується з плоскими деталями-зразками. При згинанні для плоских зразків, коли шари розташовані паралельно нейтральній площині згинання, більш критичну роль відіграє міцність зчеплення між окремими шарами, яка, як правило, завжди менша ніж міцність у площині шарів. Наявність армуючого волокна відіграє незначну роль у збільшенні міцності на згин. Проте, коли шари розташовані так, що навантаження прикладене в площині шару, вплив армування на міцність залежить від кута розташування простінок заповнення та кута малюнку перекриття.

Візуальні методи контролю [81], такі як вимірювання розмірних показників, огляд неозброєним оком чи із застосуванням мікроскопів можуть бути використані для аналізу поверхні деталі, вони не мають проникної здатності навіть у випадку використання (частково) прозорих полімерів для виготовлення деталі. Візуальні методи дозволяють якісно виявляти увесь спектр поверхневих дефектів, а при використанні вимірювальних мікроскопів, мікрометрів чи штангенциркулів – давати і кількісну оцінку розміру дефектів. Також, при огляді деталей можна контролювати наявність оголення армуючого волокна в одиничних нитках чи шарах. Якщо візуальний контроль проводити на розрізаних деталях, то це дає змогу виявляти і внутрішні дефекти, притаманні FDM/FFF 3D-друку, такі як: розшарування периметрів стінки, розшарування шарів перекриття, дефекти з'єднання заповнення та зовнішньої оболонки, розриви чи розшарування простінок заповнення, наявність сторонніх включень в порожнинах заповнення чи в товщі оболонок тощо. При дослідженні бокової поверхні деталей (перпендикулярно шарам) можлива якісна і кількісна оцінка висоти шарів та їх дефектів, при наявності. Перед дослідженнями з використанням мікроскопів, в процесі підготовки розрізу чи шліфу деталі необхідно слідкувати за температурним режимом технологічних процесів, не допускати нагріву матеріалу до температури склування полімеру. В той же час, багато полімерів негативно реагують на

нерівномірне охолодження чи нагрів, тому метод охолодження деталі повинен бути рівномірний. Рідинне охолодження у багатьох випадках також протипоказано. Всупереч рекомендаціям з підготування металографічних зразків та шліфів [82], відрізання небажано проводити абразивними кругами, особливо у випадках полімерів з високою твердістю, крихкістю (наприклад, PLA чи полімери після гартування чи нанесення покриттів). Відрізання слід виконувати пилами, фрезами, відрізними неабразивними дисками. Після відрізання зразка необхідно видалити задирки та залишки матеріалу з комірок заповнення. Шліфування та полірування для багатьох видів полімерів проводиться сухе, з протиранням поверхні зразка етиловим спиртом чи ізопропіловим спиртом при зміні зернистості шліфувального матеріалу. Використання полірувальних чи шліфувальних паст/порошків не рекомендоване. Травлення шліфу після механічної обробки не проводиться, також не рекомендоване використання розчинників типу ацетону чи керосину для протирання чи промивки поверхні зразка. При підготовці шліфу слід також враховувати особливості наявності в полімеру армуючого волокна, а саме: при відрізці та шліфуванні не допускати викидання волокна; не допускати забивання волокна зернами шліфувального матеріалу; для протирання використовувати речовини, інертні для матеріалу волокна; не допускати розпушування, розбухання чи розмокання волокна від протиральної речовини.

Відповідно до мети по розробці методу армування для покращення характеристик міцності, основним методом дослідження, що використовується в роботі, є метод статичного розтягнення, випробування на розтяг. Методами статичного розтягування визначаються такі параметри, як межа пропорційності, межа пружності, межа плинності, межа міцності та відносне подовження. У цих методах використовують розривні машини, випробування матеріалу проводять на зразках спеціальної геометрії, що описана у відповідних стандартах. Також, в процесі виготовлення зразків для

випробувань на розтяг виконувався візуальний контроль зразків, в процесі 3D-друку та після.

Для випробувань на розтяг використовували розтягову машину ИР-5047-50. Ця розтягова машина призначена для лабораторного дослідження та випробувань зразків з чорних та кольорових металів, полімерів, полімерних композиційних матеріалів та ін. зусиллям розтягу до 50 кН. Передбачена також можливість проведення випробувань на стиск, вигин і інших випробувань в залежності від встановленого додаткового обладнання. Параметри механічних властивостей, що можуть визначатись на машині: межа тимчасового опору, відносне подовження, відносне звуження, межа дійного опору, умовна межа плинності ($\sigma_{0,2}$) фізична межа плинності. Машина має такі основні технічні характеристики:

- найбільше зусилля розтягу: 50 кН;
- діапазони вимірювання зусилля: 0,1-0,5 кН, 1-5 кН, 2-50 кН;
- відносна похибка вимірювання зусилля: 1%;
- тип силовимірювача: тензоресисторний;
- швидкість переміщення активного тримача: 0,5-60 мм/хв;
- точність швидкості переміщення активного тримача: $\pm 10\%$
- найбільша відстань між тримачами: 700 мм;
- відносна похибка вимірювання переміщення тримача: 0,1%;
- ширина робочої зони між стойками: 400 мм;
- робочий струм і потужність: 380В (трифазний), до 1,6 кВт.

Для вимірювання фактичного осьового подовження зразків було обрано екстензометр Epsilon 3542-050-050ST. Екстензометри серії 3542 використовуються у випробуваннях широкого ряду матеріалів, вимірюючи деформацію як на розтяг, так і стиск. Основний вимірювальний прилад – тензометр опором 350 Ом. Модель ST призначена для випробувань за стандартних умов. Прилад допускається використовувати для циклічних випробувань, а дизайн подвійного вигину робить їх нечутливими до вібрацій. Екстензометри цієї серії оснащені пружинним механізмом швидкого

встановлення з використанням лез з загартованої інструментальної сталі. Точність відповідає стандарту ASTM E38 class B-2. Відповідно до моделі, довжина бази 50 мм, діапазон виміру деформації – до 50%, нелінійності – 10%. Стандартний набір для швидкого встановлення придатний для циліндричних зразків діаметром до 25 мм, плоских зразків товщиною до 12 мм і шириною до 31 мм.

Випробування на міцність [83] проводяться за методикою відповідно до стандарту ДСТУ ISO 6892-1:2019. Для випробування була зроблена модель пропорційного зразка, що відповідає додатку В вищевказаного стандарту (рис. 2.2). Випробування на розтяг проводились на розривній машині ІР-5047, при випробуваннях використовувався екстензометр Epsilon 3542-050-050 ST. Швидкість руху траверси при випробуваннях усіх зразків – 2 мм/хв. Випробування проводились при нормальних умовах навколишнього середовища.

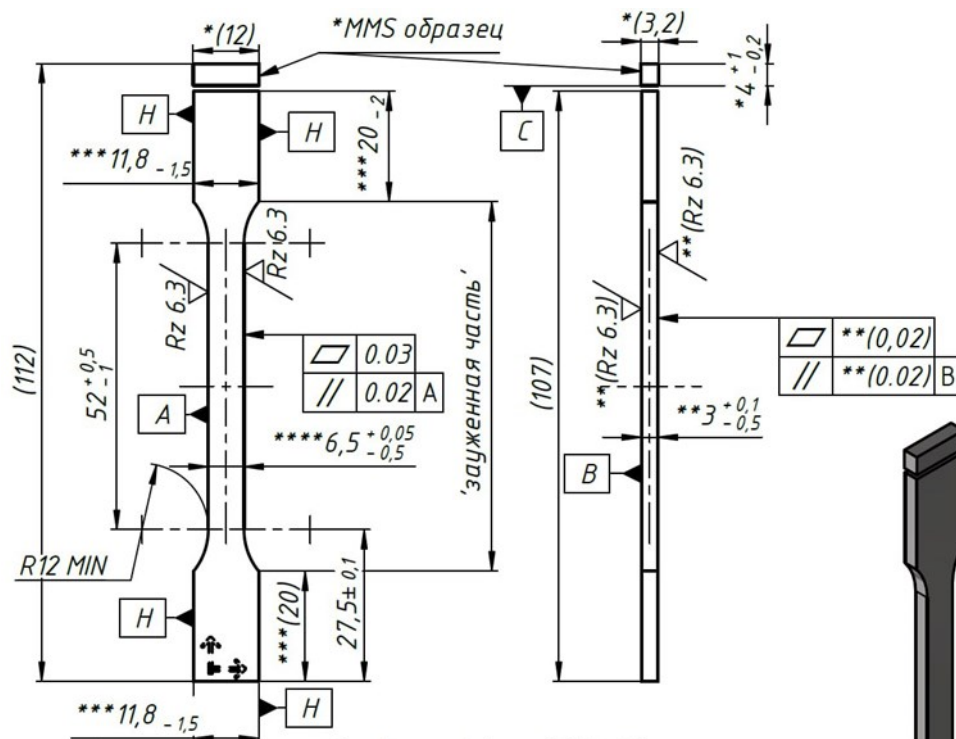


Рисунок 2.2 – Ескіз зразка для випробувань

Статистична обробка результатів експериментальних досліджень проведена з використанням програмного забезпечення Microsoft Excel. Верифікація результатів проводилась у пакеті програмного забезпечення Solidworks. Засобами CAE цього пакету проводилось моделювання композиційного матеріалу, створення моделі деталі для перевірки. Засобами CAE проведений симуляційний розрахунок деталі.

2.4 Висновки до розділу

В результаті вивчення матеріалів визначені основні характеристики, недоліки та переваги матеріалів, що використовуються для отримання виробів з полімерних матеріалів та полімерних композиційних матеріалів методом 3D-друку. Обґрунтований вибір матеріалів відносно вимог технологічності та характеристик. У якості основного полімерного матеріалу був обраний полімер типу coPET, а у якості волокна армування – базальтове волокно.

Розроблена схема та методика виконання армування дозволить створювати вироби з однонаправленим, а при необхідності – двонаправленим армуванням. Також, розглянуто особливості випробувань виробів та зразків армованого ПКМ, отриманого методами пошарового синтезу. Основним типом дослідження визначено випробування на розтяг, наведено стандарти та обладнання для проведення досліджень.

Розглянуто види досліджень, що проводяться для контролю якості матеріалів та виробів, розглянуто неруйнівні та руйнуючі методи досліджень. Відповідно до задач та мети роботи, основним видом дослідження обрано випробування на розтяг. Вказані стандарти проведення досліджень, наведені особливості використання досліджень на розтяг для випробувань шаруватих полімерних композиційних матеріалів, що отримані методами 3D-друку.

3 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ АРМУВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Розробка обладнання для армування за розробленою схемою

Відповідно до вимог та висновків, викладених в попередньому розділі, необхідно розробити технологічне обладнання для армування виробів в процесі пошарового синтезу [84]. Технологія виконання армування має двосторонній зв'язок з обладнанням – обладнання розробляється відповідно до необхідних технологічних прийомів, але виходячи з особливості конструкції обладнання та роботи з ним, технологія та технологічні прийоми можуть бути відповідно скориговані чи доповнені. Оскільки завдання дослідження включають в себе покращення існуючих технологій пошарового синтезу виробів, технологічному обладнанню відводиться провідна роль в експериментальній частині дослідження. Також, важливим аспектом при розробці технологічного обладнання є можливість виготовлення його, використовуючи основне обладнання за допомогою якого будуть проводитись наступні етапи досліджень. Відповідно, технологічне обладнання повинно бути розроблено так, щоб його деталі можливо було отримувати методами пошарового синтезу з полімерних матеріалів (3D-друком) [85, 86].

При виборі компоновання обладнань необхідно спершу визначити тип, вид і особливості обладнання, на яке воно встановлюється. Як було зазначено раніше, основним обладнанням для пошарового синтезу є FDM/FFF 3D-принтер. Оскільки технологічне обладнання, за структурою розробленого метода армування, повинно встановлюватись на платформу побудови 3D-принтера або бути пов'язаним з ним кінематично, варто розглянути основні види кінематичних побудов 3D-принтерів по особливостям платформи побудови. Особливості, що мають основне значення для обладнання: рухи, що виконує платформа побудови чи її нерухомість, наявність елементів корпусу 3D-принтеру, які можуть обмежувати доступ до обладнання під час синтезу

або накладати суттєві обмеження на конструкцію обладнання, можливий вплив наявності технологічного обладнання як додаткової маси чи стороннього тіла на платформі побудови [87].

Платформа побудови найчастіше являє собою пласку поверхню, що має функцію керованого нагріву і підтримки заданої температури та певне покриття на її частині, на яке виконується безпосереднє викладення полімеру при формуванні першого шару деталі. Варто зазначити, що температура нагріву платформи залежить від полімеру, яким виконується друк і може відрізнитись від оптимальної в певних межах по технологічним причинам, тому в більшості випадків можливо знехтувати температурними впливами на технологічне обладнання, що могли б призвести до погіршення його функціональності.

Відповідно до кінематичної побудови 3D-принтеру, платформа побудови може бути закріплена безпосередньо до корпусу принтеру або виконувати рух у напрямках осей принтера. Основними групами кінематик є Cartesian та Delta [88]. Cartesian принтери також мають поділ [89].

Одна з найбільш популярних кінематик, представлених 3D-принтерами виробників Prusa та Anycubic, має платформу побудови, що рухається вздовж осі Y, рух осі X здійснюється по напрямним елементам, що змонтовані на рухомих частинах осі Z. В даному випадку, недоліком такої кінематики є те, що елементи корпусу розташовані з боків платформи побудови, зазвичай з дуже малими зазорами до платформи. Це обмежує розміри обладнання по ширині (вздовж осі X). Також, вага пристосування додає інерційних навантажень на механізми приводу платформи побудови, що погіршує точність 3D-друку.

Кінематики типу corexy, h-bot та кінематики, представлені у 3D-принтерах виробника Ultimaker мають платформу побудови, що переміщується вздовж осі Z, а друкувальна головка переміщується вздовж осей X та Y по напрямним елементам, що знаходяться в зафіксованій площині, найчастіше – на самому верху корпусу. Така кінематика дає перевагу у тому, що платформа побудови найчастіше не має обмежувальних елементів, що

активно рухаються відносно неї в процесі 3D-друку або сама платформа не виконує частих рухів – переміщення відбувається лише при переході на наступний шар. Але така кінематика має малі зазори вздовж осі Z від платформи до рухомих частин для переміщення друкувальної головки, причому мала відстань зберігається і за площиною зони побудови. Це значно обмежує висоту технологічного обладнання. Також подібна кінематика має напямні елементи для переміщення по осі Z , що розташовані близько до однієї або двох сторін площини побудови.

Кінематика порталного типу передбачає нерухому платформу побудови, а рух друкувальної головки вздовж осей X та Y здійснюється по рамній конструкції, яка переміщується по осі Z . Перевагою такої кінематики є нерухома платформа побудови, що спрощує закріплення технологічного обладнання та маніпуляцій з ним, а також не накладає суттєвих обмежень по розміру обладнання в площині побудови. Але ця кінематика також має обмеження по висоті, особливо на початкових шарах. Це обумовлено тим, що деталі рами порталу обрамлюють зону побудови і нависають над нею. Також це обрамлення може заважати доступу до пристосування на початкових шарах.

Кінематика типу Delta має нерухому платформу побудови, а переміщення друкувальної головки по всім осям відбувається за рахунок взаємного зміщення трьох кареток, що переміщуються вздовж осі Z . При одночасному переміщенні всіх кареток виконується чисте переміщення вздовж цієї осі, а при зміщенні кареток одна відносно іншої – в площині друку. Друкувальна головка з'єднана з каретками за допомогою суцільних тяг. Переваги цієї кінематики у нерухомому столі, малих потенційних обмеженнях розміру в площині, відсутності обмежень пристосувань по висоті. Також, зазвичай 3D-принтери такої кінематики мають швидкий привод по осі Z , що важливо для забезпечення доступу до пристосування. Тому для розробки пристосування була за основу обрана кінематика типу Delta.

Технологічне обладнання, що було розроблене для виконання даного методу армування, складається з двох основних частин – рухомої утримуючої

частини (надалі відомої як перекид, рис. 3.1) та нерухомої частини (надалі відомої як рамка, рис. 3.2). Даний варіант обладнання дозволяє виконувати однонаправлене армування, бо має один перекид. Для виконання армування в двох або більше напрямків, для кожного напрямку потрібна своя рухома утримуюча частина та механізм закріплення набору волокна в початковому положенні.

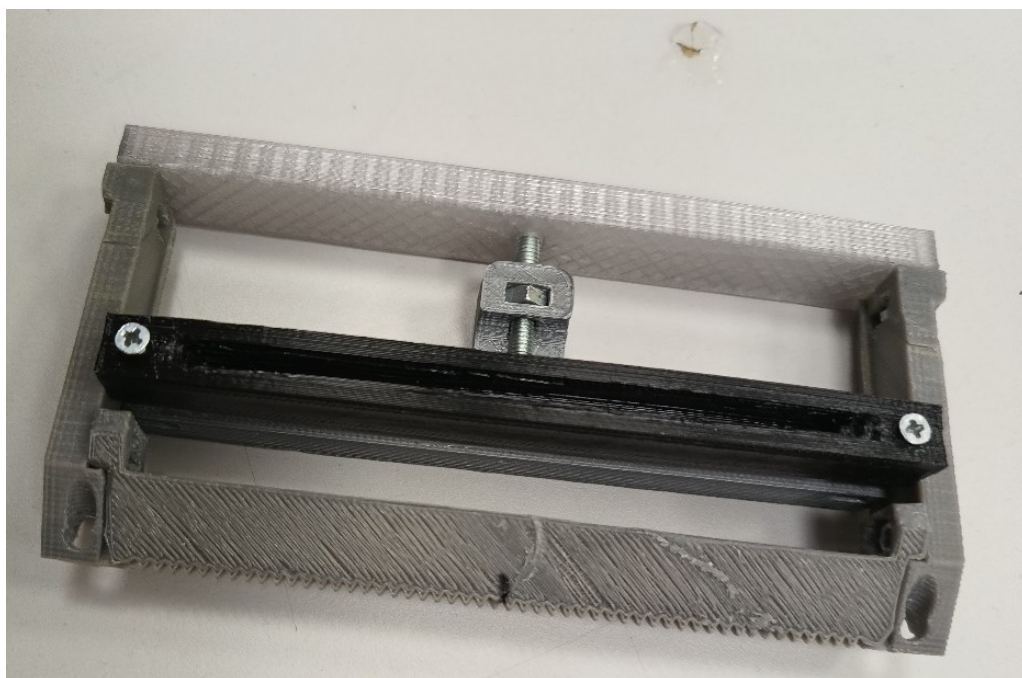


Рисунок 3.1 – Рухома частина пристосування

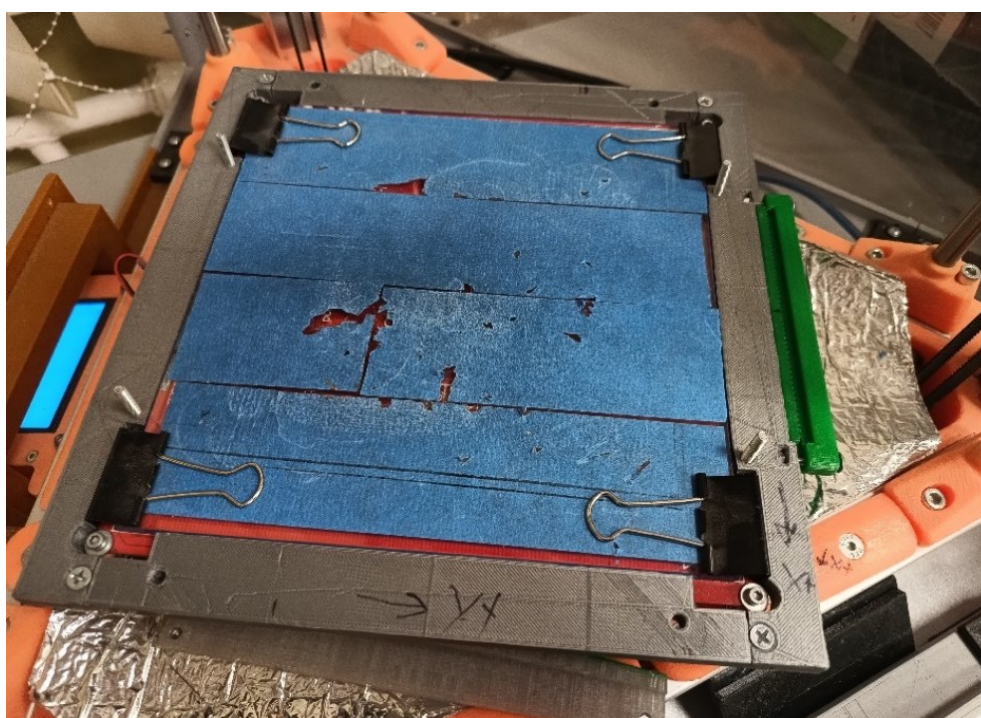


Рисунок 3.2 – Нерухома частина обладнання, встановлена на платформі побудови 3D-принтера

Рамка являє собою прямокутну конструкцію, що встановлюється на платформу побудови принтера і фіксується установчими планками до нагрівальної панелі платформи побудови, так щоб своєю верхньою поверхнею бути на одному рівні з робочою площиною платформи. На одній з сторін рамки знаходиться вузол утримання кінців волокна. Він складається з напямної гребінки, притискної площадки та притискної пластини. Напямна гребінка задає положення та щільність ниток або джгутів волокна армування, відповідно при зменшенні щільності гребінка задає кратність волокон. Притискні площадка і пластина мають покриття з невулканізованої резини і призначені для безпосередньо утримання волокна. Рамка має напямні штирі на протилежних сторонах вздовж осі наповнення, на які встановлюється перекид в одному з двох положень. Також, на рамку за необхідності встановлюються додаткові притискні планки.

Перекид являє собою прямокутну конструкцію, що має механізм утримання та направлення волокна та напямні отвори для встановлення на напямні штирі на рамці. Передня частина перекиду має напямну гребінку закритого типу, з кришкою що знімається (рис. 3.3).

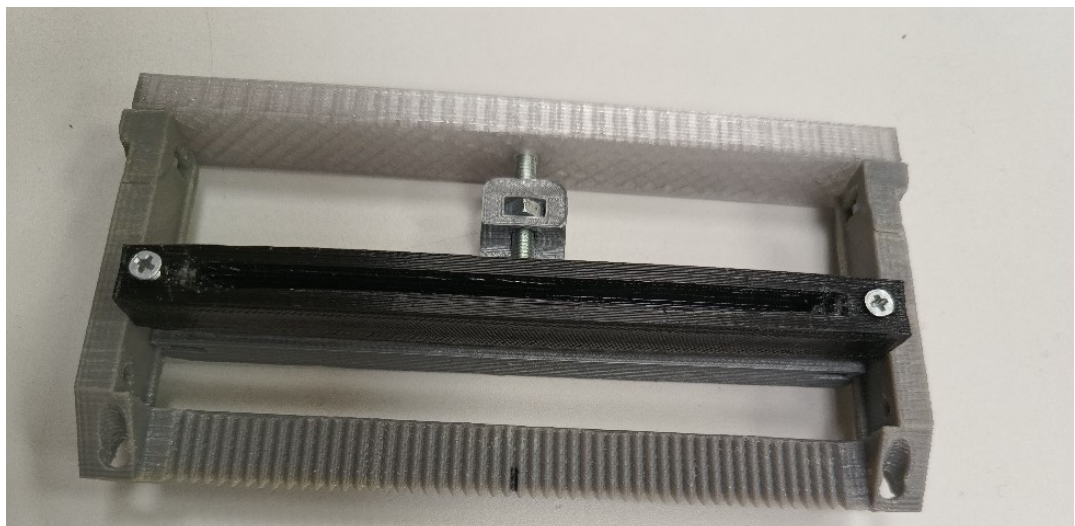


Рисунок 3.3 – Перекид з знятою кришкою

Розміри та частота гребінки повторюють гребінку на рамці. Ця напрямна гребінка також задає положення ниток або джгутів волокна армуючого матеріалу. За напрямною гребінкою на напрямних рейках розташований вузол утримання і натягу волокна. Утримання здійснюється притиском через площадку і пластину з покриттям з невулканізованої резини, натяг – гвинтовий (рис. 3.4).

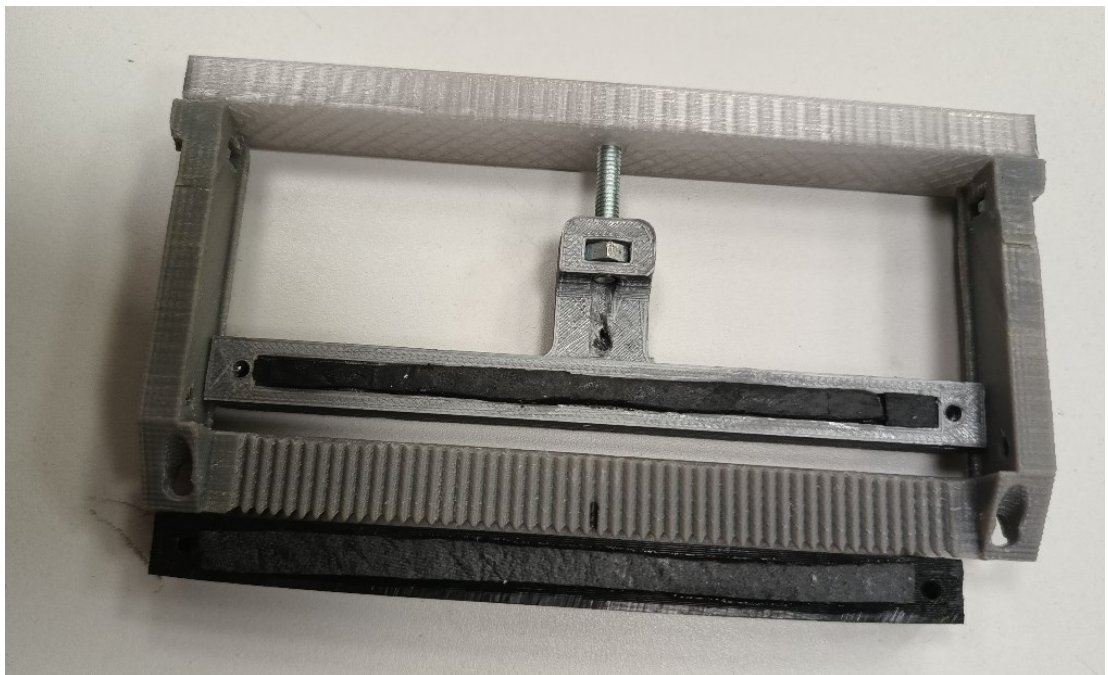


Рисунок 3.4 – Вузол утримання і натягу волокна

Передня частина перекиду зрізана під кутами, що, відповідно з напрямним отворами, дозволяє встановлювати перекид на рамці так, щоб весь набір волокон виходив у площину платформи побудови. Це дозволяє викладення волокон армуючого матеріалу навіть після першого надрукованого шару на платформі побудови (рис. 3.5, рис. 3.6).

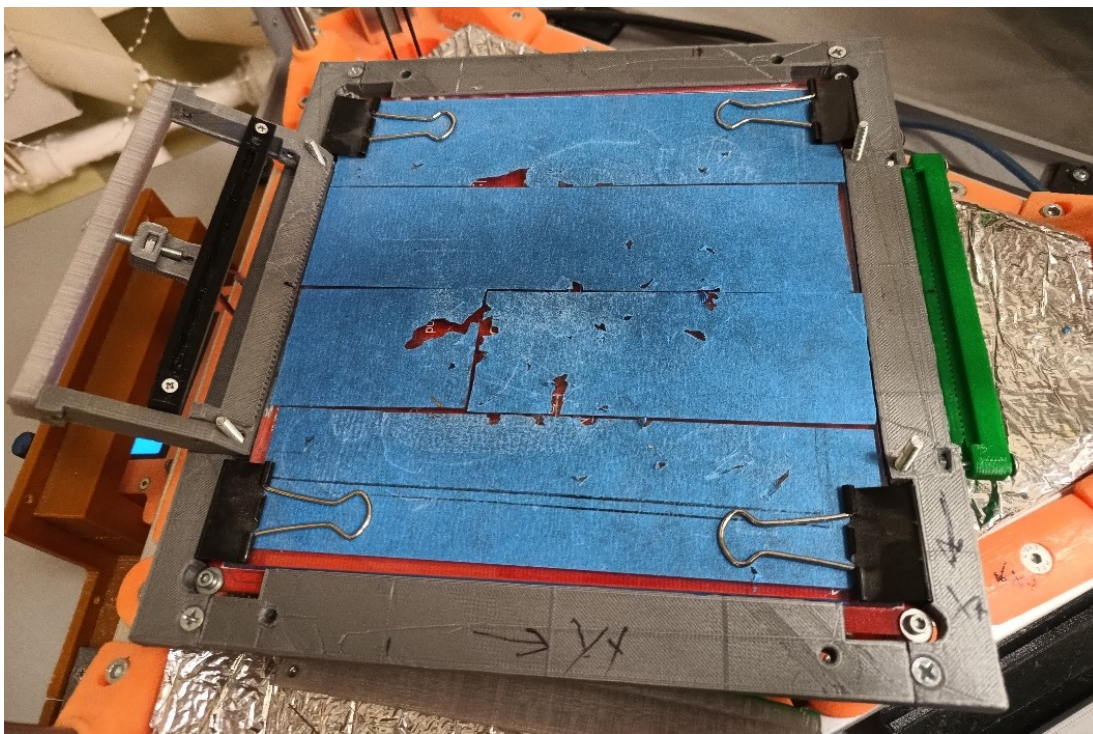


Рисунок 3.5 – Рухома частина встановлена на нерухому в положенні прокладання першого шару волокна

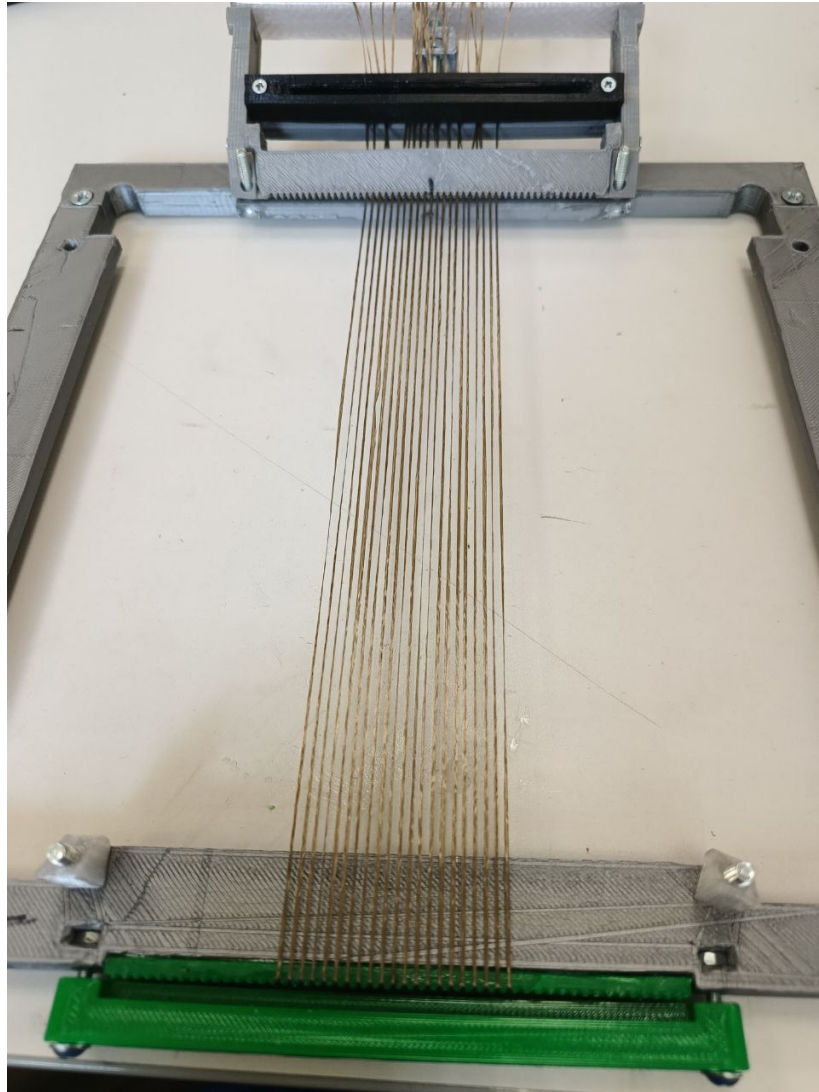


Рисунок 3.6 – Набір волокна встановлений в пристосуванні перед монтажем рамки

За умовами розробленого технологічного обладнання, відстань між одиничними нитками волокна – 2 мм. Така відстань обґрунтована розміром та формою волокна. Волокно, яке застосовувалось у дослідженні, поставлялось у вигляді плоских джгутів з шириною джгуту 1 мм. Відповідно, для забезпечення рівномірності заповнення армування по шару, ширина проміжків між волокном була прийнята рівною ширині волокон. Це необхідно для забезпечення рівномірності міжшарового зчеплення полімеру при друці наступного шару після прокладання шару волокна. З умов такої рівномірності і була прийнята відстань у 2 мм.

Максимальні розміри області побудови деталей, ширина і довжина – 75 мм і 130 мм. Висота деталей не регламентувалась, прийнята обмеженою висотою зони побудови деталей по розмірам 3D-принтера (420 мм). Виготовлення всіх деталей технологічного обладнання виконувалось методами FDM/FFF 3D-друку.

3.2 Виготовлення зразків для випробувань на розтяг та випробування

Для проведення випробувань була поставлена задача провести дослідження зі зміною параметрів армування для дослідження їх впливу на властивості міцності матеріалу, що отриманий розробленим способом армування. Досліджується вплив зміни двох параметрів – відстані між армованими шарами та дослідження впливу щільності друкованої структури заповнення. Частота прокладання була розглянута в трьох варіантах – на кожному шару, через один шар та через два шари. Зміна щільності заповнення розглядалась в варіантах щільності у 20%, 30% та 40% з частотою прокладання волокна на кожному шару.

При виготовленні зразка з прокладанням волокна на кожному шару, відповідно до розмірів робочої частини зразка, використовувалось армування в кількості 3 джгута на шар, що обумовлено шириною робочої частини зразка. Відповідно до заданих параметрів друку, з товщиною шару 0,3 мм, при друкуванні зразка застосовувалось 7 шарів армування. Зразок складався з 10 шарів, волокно армування прокладалось між шарами від другого до восьмого. Шари 1, 2 та 9, 10 друкувались без армування. Притискні планки встановлювались на рамку для перших двох шарів армування. Для друку використовувався філамент діаметром 1,75 мм, діаметр сопла – 0,4 мм, максимальний параметр швидкості друку – 30 мм/с. Встановлена товщина стінки 1,2 мм (3 периметра), товщина верхніх і нижніх поверхонь – 0,9 мм (3 шари). Тип заповнення – квадратна сітка, з кутом ліній відносно деталі 45°,

щільність заповнення – 30%. Заповнення перекриття – 25%. Температура друку – друкувального сопла 240 °С, нагріву поверхні побудови – 60 °С. Такі параметри відповідають оптимальним параметрам друку, що надаються виробниками філаменту. Товщина шару була обрана відповідно до діаметру сопла друкувальної головки 3D-принтеру, що використовувався для виготовлення зразків. Товщина стінок та кількість периметрів була обрана з розрахунку достатнього закріплення волокна у кінцях зразку, для забезпечення достатності матеріалу полімеру у робочій зоні зразка [90] та з точки зору достатньої повноти використання характеристик полімеру [91, 92].

З метою визначення раціональної структури та визначення високих властивостей, були виготовлені зразки з різною схемою пошарового армування. Для випробувань було виготовлено комплект з 10 зразків двома партіями, 5 зразків без армування, інші 5 – з армуванням, налаштування друку для зразків з волокном та без були прийняті однакові. При виготовленні партій зразків з прокладанням волокна через один та через два шари всі інші параметри процесу друку та кількість джгутів волокна на шар не змінювались. Кількість зразків у всіх партіях – також 5, у всіх зразках цих партій була використана щільність заповнення у 30%. При виготовленні партій зразків з змінюю щільності заповнення було виготовлено дві партії по 5 зразків з схемою армування на кожному шарі.

При виготовленні зразків контролювався вихід волокна армування за межі деталі (назовні) та контролювалась фіксація волокна на торцях зразка при зміні напрямку укладання армуючого матеріалу. Зразки з дефектами виходу волокна та нефіксацією до подальших випробувань не допускались. Після друку зразків відрізались залишкові джгути волокна, зачищалась поверхня зразків у місцях захвату. Перед випробуванням на робочу частину зразків наносились лінії розмітки з кроком 5 мм.

Рисунки 3.8 – 3.10 демонструють типові технологічні кроки армування в процесі друку зразків. Рисунок 3.11 та 3.12 – зовнішній вид зразків, в даному

випадку – з армуванням на кожному шарі та щільністю заповнення 30% . На рис. 3.8 і 3.10 також видно додаткові притиски.



Рисунок 3.8 – Прокладене волокно перед друкуванням закріплюючого шару



Рисунок 3.9 – Процес друкування закріплюючого шару



Рисунок 3.10 – Постановка друку на паузу і відведення друкувальної головки



Рисунок 3.11 – Частина комплекту зразків, пара без армування і пара з армуванням



Рисунок 3.12 – Зразки 3 і 4 з партії зразків з армуванням

В результаті випробувань партій зразків були отримані результати межі міцності σ_b , межі плинності $\sigma_{0,2}$ та модуля пружності E . Для зразків, де розрив відбувся в межах бази екстензометра були також отримані результати відносного подовження δ_5 . Також для довідки вказана площа перерізу робочої зони зразка F_0 . Результати наведені в табл. 3.2 для зразків без армування, щільність заповнення 30%. В табл. 3.3, 3.4, 3.5 – для зразків з щільністю заповнення 30% з армуванням в кожному шарі, через шар і через два шари. В табл. 3.6, 3.7 – для зразків з армуванням в кожному шарі, щільності заповнення 20% і 40%. Зовнішній вид зразків після випробувань – на рис. 3.13 і 3.14, в даному випадку наведено фото зразків з армуванням на кожному шарі, 30% щільність заповнення.

Таблиця 3.2 – Результати випробувань (без армування, 30% щільність)

Зразок	1	2	3	4	5
F_0 , мм ²	19,90	20,20	19,95	20	20,30
σ_b , МПа	31,2	31,6	31,5	31,3	31,3
$\sigma_{0,2}$, МПа	26,5	26,2	26,3	26,5	26,3
E , ГПа	1,57	1,57	1,55	1,50	1,56

δ_5 , %	11,6	10,8	11,5	10,9	11,4
----------------	------	------	------	------	------

Таблиця 3.3 – Результати випробувань (з армуванням на кожному шарі,
30% щільність)

Зразок	1	2	3	4	5
F_0 , мм ²	21,85	21,90	22,01	21,73	21,76
σ_b , МПа	55,3	54,6	54,7	59,4	58,5
$\sigma_{0,2}$, МПа	48,9	48,1	48,4	53,7	52,1
E, ГПа	3,21	3,23	3,20	3,25	3,23
δ_5 , %	3,6	-	-	3,4	3,7

Таблиця 3.4 – Результати випробувань (з армуванням через один шар,
30% щільність)

Зразок	1	2	3	4	5
F_0 , мм ²	21,70	21,75	21,90	21,70	21,67
σ_b , МПа	49,9	50,1	50,1	50	49,8
$\sigma_{0,2}$, МПа	45,1	45,6	45,5	45,4	45
E, ГПа	2,95	2,96	2,96	2,95	2,94
δ_5 , %	-	4,1	4,2	-	4,2

Таблиця 3.5 – Результати випробувань (з армуванням через два шари,
30% щільність)

Зразок	1	2	3	4	5
F_0 , мм ²	21,60	21,65	21,80	21,75	21,63
σ_b , МПа	40,3	41,0	40,3	40,4	39,9
$\sigma_{0,2}$, МПа	35,9	36,2	35,7	36,1	35,6
E, ГПа	2,69	2,71	2,70	2,70	2,66
δ_5 , %	-	4,7	4,8	-	4,8

Таблиця 3.6 – Результати випробувань (з армуванням на кожному шарі,
20% щільність)

Зразок	1	2	3	4	5
F_0 , мм ²	21,83	21,80	21,85	21,90	21,82
σ_b , МПа	52,1	51,6	52,2	55,3	53,9
$\sigma_{0,2}$, МПа	48,1	47,1	48,9	50,7	48,9
E , ГПа	3,21	3,23	3,20	3,25	3,23
δ_5 , %	-	3,6	3,7	-	3,7

Таблиця 3.7 – Результати випробувань (з армуванням на кожному шарі,
40% щільність)

Зразок	1	2	3	4	5
F_0 , мм ²	21,71	21,83	21,92	21,95	21,70
σ_b , МПа	55,8	55,1	55,1	60,3	59,8
$\sigma_{0,2}$, МПа	50,1	49,2	48,4	55,7	54,9
E , ГПа	3,22	3,24	3,21	3,26	3,25
δ_5 , %	3,6	-	-	3,4	3,7



Рисунок 3.13 – Зразки 1 та 2 з партії зразків без армування після випробувань



Рисунок 3.14 – Зразки 3 і 4 з партії зразків з армуванням після випробувань

За результатами випробувань для кожної серії зразків були взяті середні по серії властивості. Для зручності подальшого аналізу результати будуть згруповані у 6 варіантів:

1. Без армування, щільність заповнення 30% (референсний зразок);
2. З армуванням в кожному шарі, щільність заповнення 30%;
3. З армуванням через шар, щільність заповнення 30%;
4. З армуванням через два шари, щільність заповнення 30%;
5. З армуванням в кожному шарі, щільність заповнення 20%;
6. З армуванням в кожному шарі, щільність заповнення 40%.

Відповідно до розподілу варіантів, характеристики матеріалу внесені в табл. 3.8. Графіки залежності межі міцності та модулю пружності представлені на рис. 3.15 – 3.20.

Таблиця 3.8 – Результати випробувань по варіантам армування

Варіант	1	2	3	4	5	6
F_0 , мм ²	20,07	21,85	21,74	21,69	21,84	21,82
σ_B , МПа	31,4	56,5	49,9	40,4	53	57,1
$\sigma_{0,2}$, МПа	26,4	50,2	45,3	35,9	48,7	51,5
E , ГПа	1,55	3,22	2,95	2,69	3,22	3,24
δ_5 , %	11,2	3,6	4,2	4,7	3,7	3,6

В залежності від параметру, що змінювався, зразки були внесені у групи. При зміні відстані між шарами армування розглядалась група зразків 2, 3, 4. При зміні щільності заповнення розглядалась група зразків 5, 2, 6.

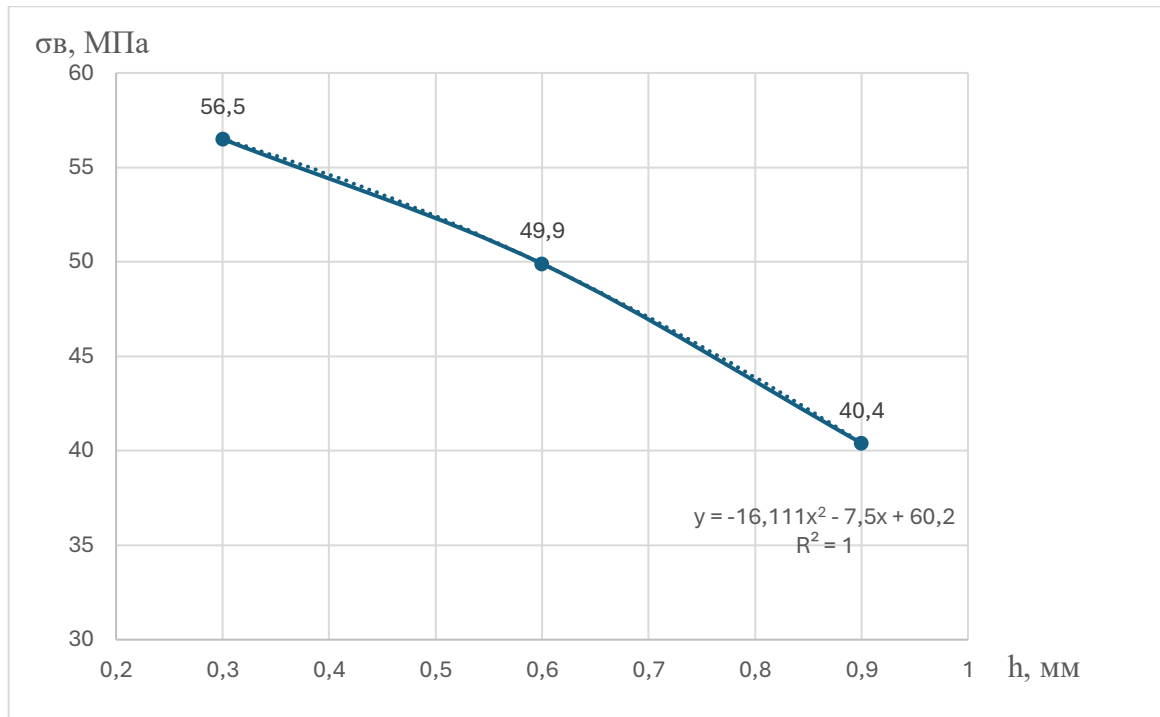


Рисунок 3.15 – Залежність межі міцності від відстані між шарами армування

При збільшенні відстані між шарами h у три рази, межа міцності зменшується на 28,5%. Найбільша міцність досягається при мінімальній відстані між шарами – 0,3 мм. Для математичного опису розподілення отриманих даних були проаналізовані ряд апроксимуючих функцій, зокрема – лінійна, поліноміальна та ступенева. Визначено, що найбільш точно отримані дані можна описати поліноміальною (квадратичною) залежністю другого ступеню:

$$\sigma_b = -16,111h^2 - 7,5h + 60,2 \quad (3.1)$$

де h – відстань між шарами армування, мм

σ_b – межа міцності, МПа

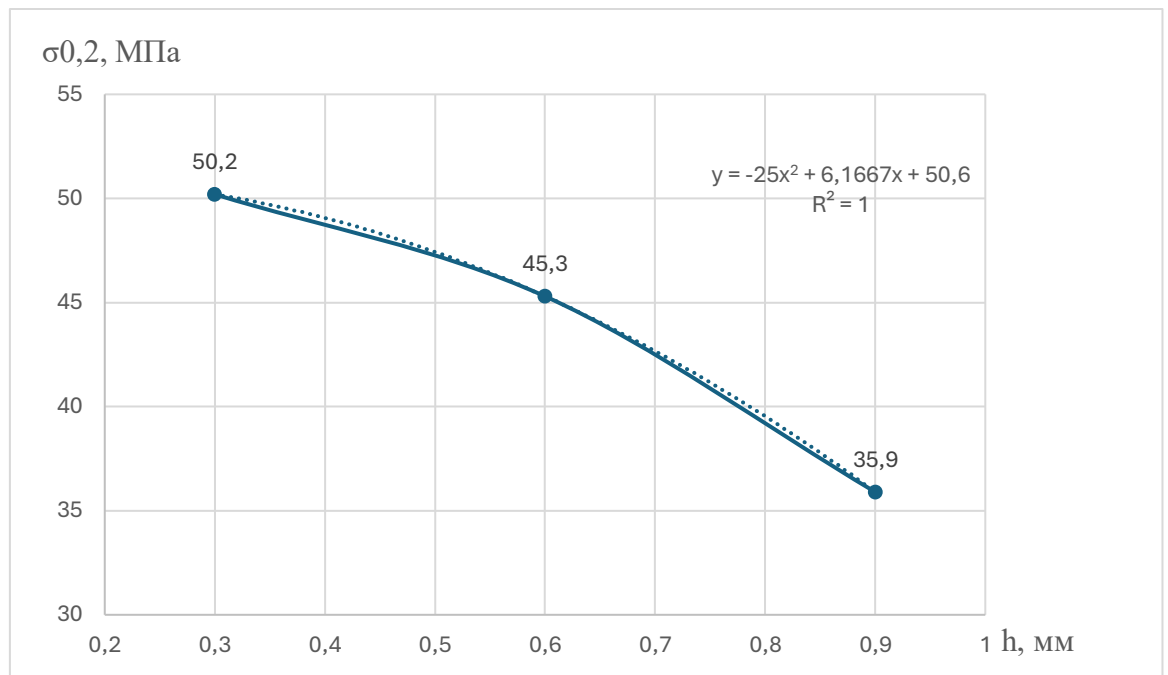


Рисунок 3.16 – Залежність межі плинності від відстані між шарами армування

Межа плинності зі збільшенням відстані між шарами також зменшується на 28,5%. Найбільше значення $\sigma_{0,2}$ досягається при мінімальній відстані між шарами – 0,3 мм. Отримані дані також можна описати поліноміальною (квадратичною) залежністю другого ступеню:

$$\sigma_{0,2} = 25h^2 + 6,1667h + 50,6 \quad (3.2)$$

де h – відстань між шарами армування, мм

$\sigma_{0,2}$ – межа плинності, МПа

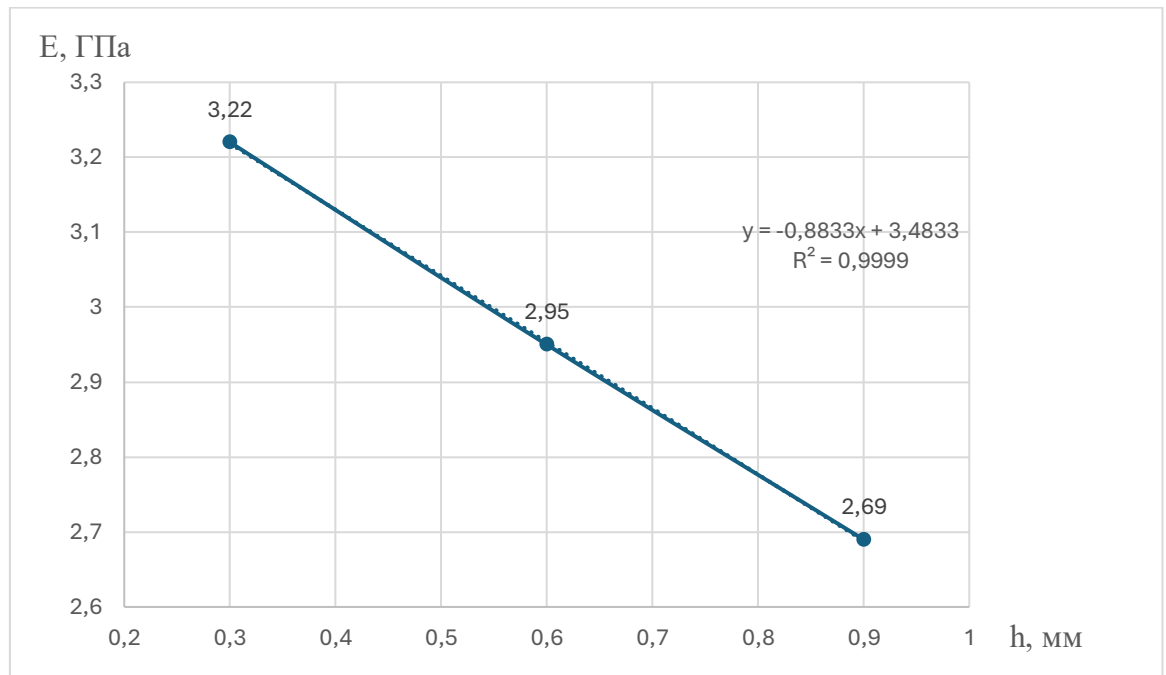


Рисунок 3.17 – Залежність модуля пружності від відстані між шарами армування

Модуль пружності зменшується на 16,5%, найбільше значення також спостерігається при $h = 0,3$ мм. Залежність модуля пружності від значення h можна описати лінійною залежністю, що наведена нижче:

$$E = -0,8833h + 3,4833 \quad (3.3)$$

де h – відстань між шарами армування, мм

E – модуль пружності, ГПа

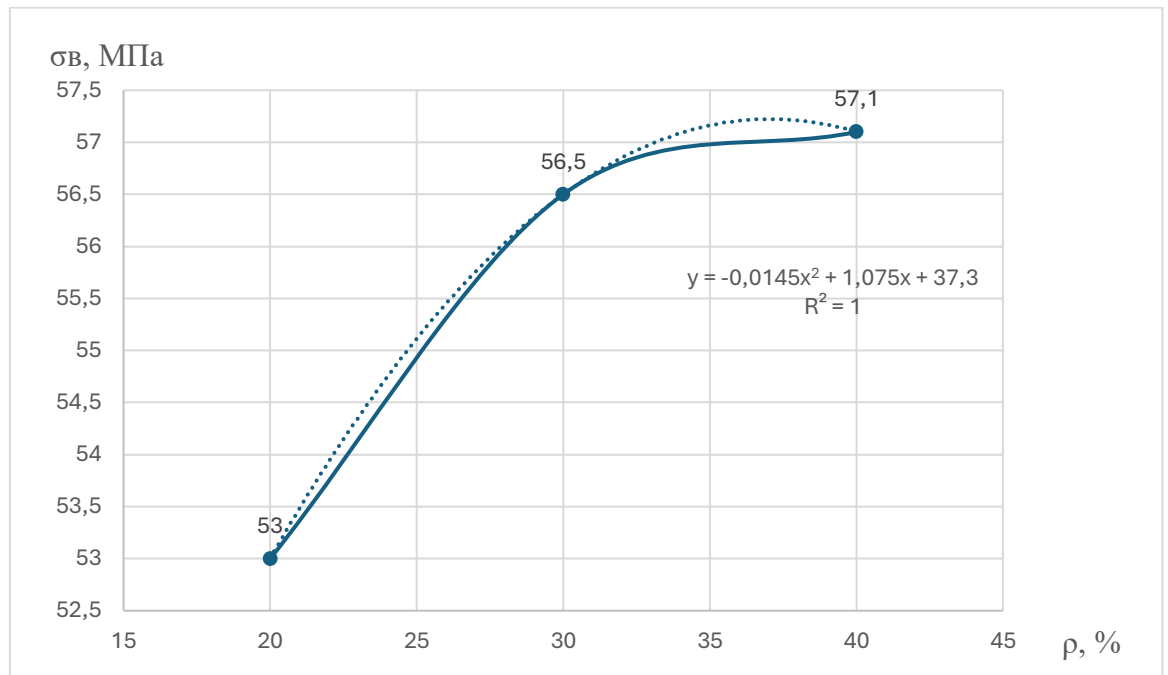


Рисунок 3.18 – Залежність межі міцності від щільності заповнення

При зміні щільності заповнення від 20% до 40% загальне збільшення межі міцності складає 7,7%. Із побудованого графіка видно, що межа міцності зростає зі збільшенням щільності заповнення. Зокрема, при збільшенні щільності з 20% до 30%, приріст межі міцності складає 3,5 МПа, тоді як при збільшенні з 30% до 40% – лише 0,6. Це свідчить, що зі зростанням щільності заповнення структура матеріалу поступово насичується і подальше ущільнення дає менший приріст міцності. Ця тенденція характерна для деталей, що отримані методом пошарового синтезу. Аналіз апроксимуючих функцій показав, що залежність межі міцності від щільності заповнення можна описати поліноміальною залежністю другого ступеню:

$$\sigma_b = -0,0145 \rho^2 + 1,075 \rho + 37,3 \quad (3.4)$$

де ρ – щільність заповнення, %

σ_b – межа міцності, МПа

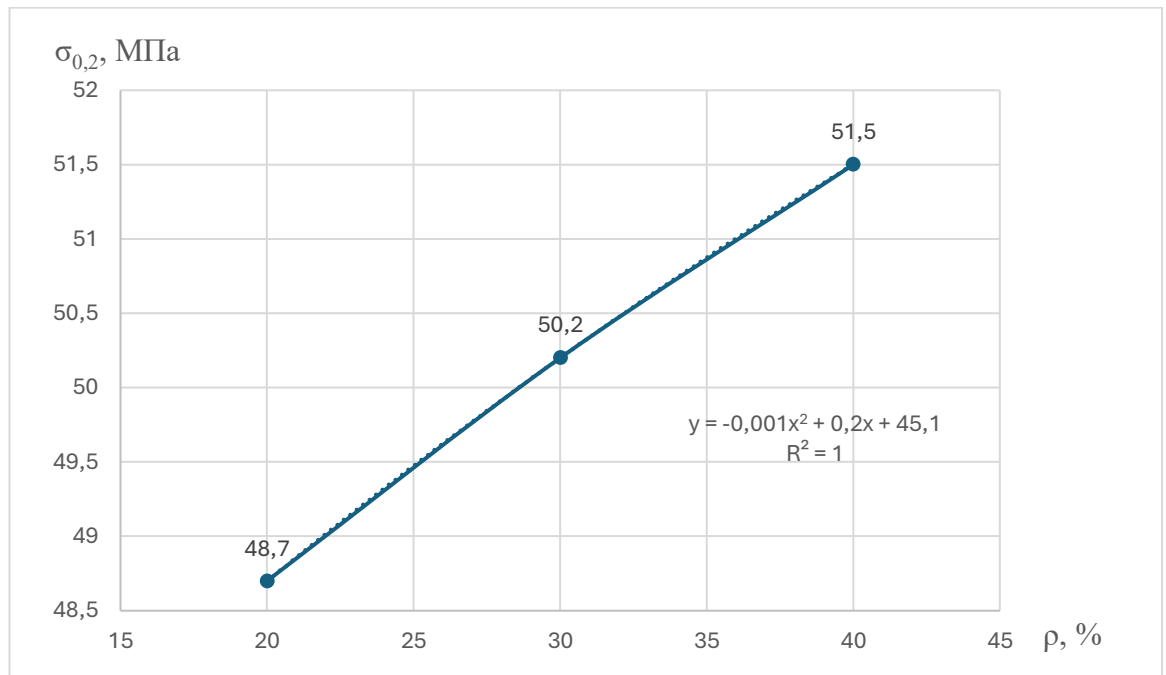


Рисунок 3.19 – Залежність межі плинності від щільності заповнення

При збільшенні щільності заповнення від 20% до 40% загальне збільшення межі плинності складає 5,8%. На відміну від межі міцності, збільшення межі плинності на заданому діапазоні більш рівномірне. Для математичного опису розподілення отриманих даних визначено поліноміальну функцію:

$$\sigma_{0,2} = -0,001 \rho^2 + 0,2 \rho + 45,1 \quad (3.5)$$

де ρ – щільність заповнення, %

$\sigma_{0,2}$ – межа плинності, МПа

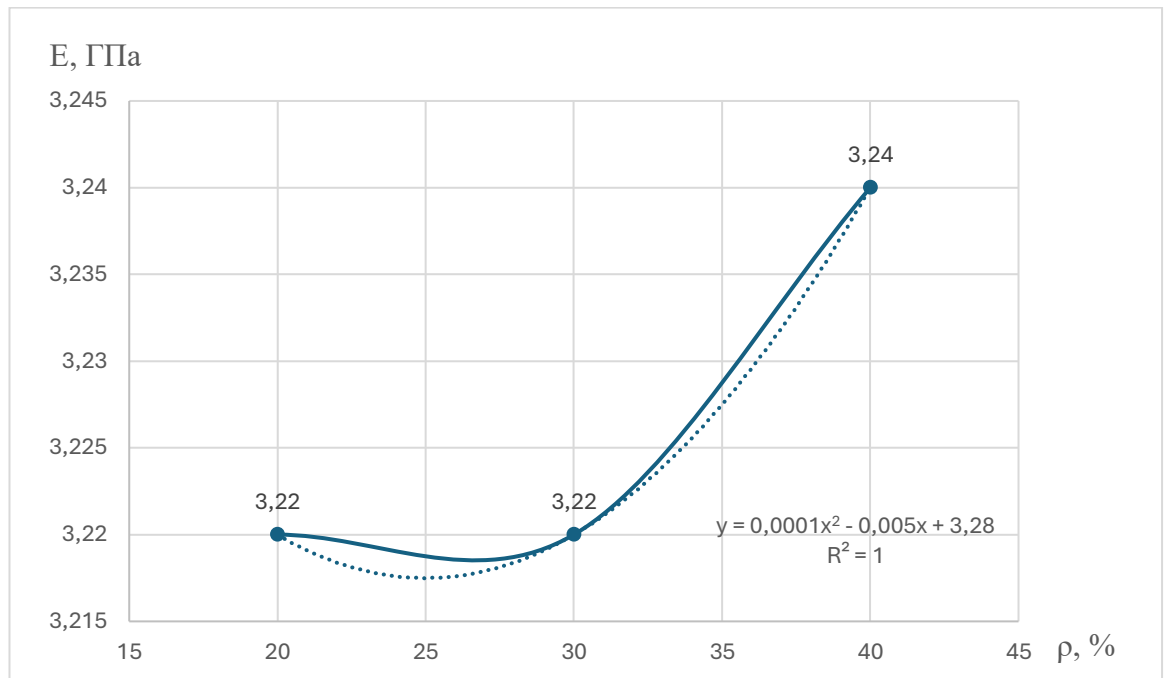


Рисунок 3.20 – Залежність модуля пружності від щільності заповнення

Зі збільшенням щільності наповнення модуль пружності практично не змінюється, але для визначення модуля пружності у межах заданого діапазону щільностей також можна використовувати поліноміальну функцію:

$$E = -0,0001 \rho^2 - 0,005 \rho + 3,28 \quad (3,6)$$

де ρ – щільність заповнення, %

E – модуль пружності, ГПа

Визначені залежності дозволяють прогнозувати властивості матеріалу в залежності від параметрів армування чи налаштування режимів 3D-друку. Відповідно до коефіцієнтів і типів залежностей, основним фактором впливу на властивості полімерного композиційного матеріалу, отриманим 3D-друком, є відстань між шарами армування. Щільність заповнення хоч і впливає на властивості матеріалу, вплив зміни цього параметру менший.

3.3 Висновки до розділу

Зразки, армовані волокном, показали вищі характеристики міцності та модулю пружності. По результатах випробувань різних варіантів структури та схеми армування, була встановлена залежність властивостей міцності матеріалу від параметрів армування. Таким чином, в залежності від частоти прокладення волокна – через два шари, через один шар та у кожному шарі, межа міцності збільшувалась на 29%, 59% і 80%. Модуль пружності збільшувався, відповідно, на 74%, 90% та 101%. Причому, зміна технологічного параметру 3D-друку, а саме – щільності заповнення, при постійній частоті прокладання волокна, мало незначний вплив на властивості. При зміні частоти заповнення з 30% до 20%, межа міцності зменшилась на 6%, межа плинності – на 3%. При зміні частоти заповнення з 30% до 40%, межа міцності і плинності збільшилась відповідно на 1% та 2%. Модуль пружності змінювався не більш як на 1% в обох випадках зміни щільності заповнення. Виходячи з цього можна зробити вивід, що збільшення частоти армування в перерізі виробу відіграє основну роль у збільшенні характеристик міцності виробу.

Визначено залежності властивостей матеріалу від параметрів армування та налаштувань 3D-друку. Визначено, що в порівнянні з базовим зразком без армування та з щільністю заповнення 30% найбільший приріст міцності забезпечується армуванням в кожному шарі, тобто з відстанню між шарами у 0,3 мм. Відстань між шарами армування відіграє найбільший вплив такі властивості матеріалу, як межа міцності, межа плинності та модуль пружності. Отримані в результаті обробки графіків апроксимаційні рівняння дозволяють прогнозувати властивості в зазначених діапазонах.

При збільшенні характеристик, армування не призводило до виникнення недоліків, таких як збільшення ламкості зразків або передчасний розрив та розшарування деталей через наявність стороннього матеріалу між надрукованими шарами пластику. Також, при дотриманні відповідних

мінімальних зазорів та проміжків між волокном армування та поверхнями деталі, внесення армування не призводить до появи дефектів на поверхнях деталей, таких як розшарування, пори чи розриви матеріалу. Експериментальний аналіз характеристик виробів отриманих розробленим методом армування довів роботоздатність такого методу армування, довів покращення характеристик матеріалу та деталей.

Задача для наступного розділу дослідження полягає у розрахунку деталі з полімерного композиційного матеріалу, що отриманий даним методом армування та експериментальної верифікації результатів [93].

4 РОЗРАХУНОК ДЕТАЛІ З ПКМ І ВЕРИФІКАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1 Обґрунтування верифікації результатів

Результати випробувань, що були отримані в попередньому розділі, потребують перевірки. Це пов'язано з тим, що, як було раніше зазначено, фізико-механічні властивості виробів, отриманих пошаровим синтезом, суттєво залежать не тільки від матеріалу, а й від геометрії виробу та технологічних режимів 3D-друку. На міцність може впливати такі параметри синтезу, як кількість периметрів у стінці в площині шару, діаметр сопла (який визначає ширину одиничного периметра), товщина шару, кількість шарів суцільного перекриття низу і верху деталі, щільність заповнення, рисунок заповнення. Рисунок заповнення також може надавати деталі ортотропічні властивості стосовно навантажень, що діють в площині шару. В залежності від кута, під яким розташовані лінії заповнення відносно напрямку дії зовнішніх сил, відбувається різне розподілення навантаження на відповідно заповнення і оболонку деталі. Хоча заповнення і оболонка є суцільною, скріпленою конструкцією, просторова структура заповнення з'єднана з оболонкою лише в певних дискретних точках. Це також може викликати нерівномірне розподілення навантажень і напружень при дії розподілених сил на стінки деталі. Відповідно, властивості матеріалу, отримані як результат випробувань, відповідають виробам лише з такими технологічними параметрами структур 3D-друку.

Температура сопла друкувальної головки також має вплив на міцність, як в межах шару, так і на адгезію між шарами. Але, на відміну від інших технологічних параметрів синтезу, вибір температури сопла друкувальної головки залежить від матеріалу, що використовується.

Слід зазначити, що результати випробувань мають користь лише для певної схеми методу армування. Відповідно до проведених випробувань, отримані властивості матеріалу відповідають пошаровому однонаправленому

армуванню з частотою одиничних ниток волокна у 2 мм та прокладанню набору волокон кожен шар окрім двох перших та двох останніх.

Виходячи з цієї комбінації тверджень, можна зробити висновок, що таким чином був отриманий ПКМ з певними характеристиками міцності. Тому необхідно перевірити гіпотезу, що властивості цього матеріалу будуть подібні чи однакові незалежно від просторової форми деталі. Це і є обґрунтуванням необхідності верифікації результатів та підтвердження працездатності розробленого методу пошарового синтезу ПКМ.

Процес верифікації полягає у створенні моделі виробу у CAD (computer aided design) системі, розрахунок її в програмному забезпеченні CAE (computer aided engineering), виготовлення виробу та його випробування. У якості програмного забезпечення був обраний програмний пакет Solidworks версії 2020. Перевага цього ПЗ у тому, що в ньому реалізовано функціонал CAD та CAE в одному спільному середовищі, без потреби переносити об'єкти між різними програмами чи необхідності конвертацій файлів в інші формати. Розрахунковий модуль (Solidworks Simulation) вбудований в основну програму як додаток до основного функціоналу моделювання, що дозволяє умовам розрахунку (закріплення, прикладення зусиль і т.д.) параметрично змінюватись при змінах геометрії моделі. Розрахунок базується на методі скінченних елементів (MCE) [94].

4.2 Сутність методу скінчених елементів

Метод скінченних елементів – числовий метод розв'язання диференціальних рівнянь, який передбачає розбиття області або об'єкта дослідження на скінченну кількість елементів [95]. Це необхідно для апроксимації тіл та об'ємів для побудування моделі середовища у вигляді сітки елементів. Елементи можуть бути тривимірними чи двовимірними, якщо певна задача допускає 2D-апроксимацію. Найчастіші форми елементів – трикутники та чотирикутники для двовимірних сіток та тетраедри чи куби для

тривимірної. Побудова сітки необхідна для надання кожній вершині елемента ряду параметрів, що повністю описує його, відповідно до типу аналізу та виду елемента, що використовується (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – CAD-модель і модель розбита на сітку елементів

Після цього програмний модуль розробляє рівняння, які керують поведінкою кожного вузла та елемента, з врахуванням з'єднань вузлів і елементів з іншими. Ці рівняння засновані на реакції елементів відповідно до типу аналізу та заданих властивостей матеріалу (матеріалів) об'єму [96]. Далі програма впорядковує рівняння для кожного елемента в загальну систему рівнянь і вираховує невідомі, використовуючи за кінцеві умови параметри навантажень, закріплень, зв'язків і інші кінцеві параметри. Наприклад, при розрахуванні напружень для кожного вузла розраховується переміщення, з чого, відносно характеристик матеріалу, розраховуються деформації і кінцеві напруження [97]. Отримані результати формуються у вигляді епюр розподілення, у вигляді кольорового спектру на моделі (рис. 4.2). Також є можливість задавати положення датчиків у вузлах чи елементах і формувати таблицю результатів.

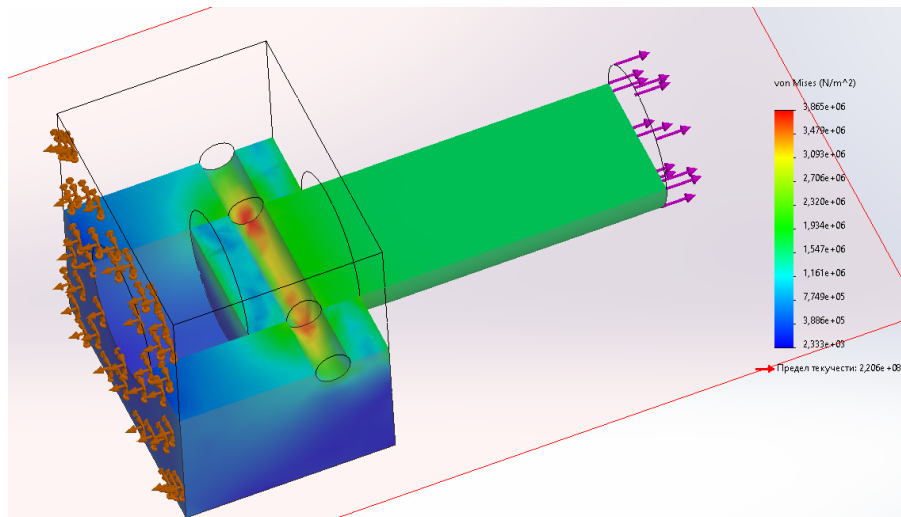


Рисунок 4.2 – Приклад епюри напружень з розрізом

Однією з переваг МСЕ є його здатність обробляти геометрії широкого спектру складностей. Цей метод можна використовувати для аналізу тіл, що мають неоднорідні матеріали та нерівномірне навантаження чи розподіл зовнішніх сил, що робить його потужним інструментом для моделювання. Ще одна перевага МСЕ – здатність аналізу широкого спектру фізичних явищ. Наприклад, його можна використовувати для моделювання поведінки конструкцій під впливом механічних навантажень, для аналізу передачі тепла через матеріали, для моделювання та аналізу потоку рідин чи газів через складні геометрії. Однак МСЕ має деякі обмеження. Одним з обмежень – процес аналізу може бути обчислювально-інтенсивним, вимагаючи значних обчислювальних ресурсів для вирішення задач. Крім того, точність методу залежить від якості моделі скінчених елементів та точності вхідних даних.

Точність моделі залежить в першу чергу від параметрів сітки. Розглядаючи особливості побудови сіток, можливо виділити два основних параметра якості сітки – розмір елементів сітки та структурованість сітки.

Розмір елементів сітки повинен відповідати локальній геометрії деталі. Виходячи з умови усереднення розподілу елементів, у будь-якому перетині деталі повинно бути не менше трьох елементів по товщині. Це викликано недопущенням концентрації уявних напружень від зовнішніх навантажень у

одиночному вузлу сітки, який являє нескінченно малий об'єм, що спотворює результат. Похибки такого типу також можуть виникати біля місць закріплень, що також пов'язано з ефектами вузлової концентрації уявних напружень. Такі помилки мають назву похибок крайового ефекту. Хоча найпростішим способом вирішення таких проблем точності результатів є використання елементів меншого розміру, це підвищує обчислювальну складність та важкість задачі. Час розрахунку в основному має прямо пропорційну залежність від кількості елементів сітки. В цьому випадку краще використовувати елементи керування сіткою. Вони дозволяють локально згущувати сітку, вставляти елементи меншого розміру або подрібнювати елементи вздовж кромки, біля точок чи кривих на гранях. Локальне згущення сітки також важливе для випадків нерівномірного розподілу навантажень, щоб більш точно розподілити зусилля по елементах сітки.

Структурованість сітки – параметр сітки, що показує наскільки рівномірним є розмір елементів та їх розподіл. Наприклад, сітка на основі тетраедрів може генеруватись з великим максимальним співвідношенням сторін, відповідно до налаштувань. Це призводить до можливої генерації тетраедрів сильно витягнутої форми, де вузли при вершинах тетраедру розподілені нерівномірно. Це погіршує точність результатів через велику і нерівномірну відстань між вузлами сітки, а при скупченнях таких елементів за рахунок передачі напружень/деформацій/переміщень між ними з похибками. Це призводить до ітеративного накопичення похибок, що призводить до локального або навіть глобального погіршення точності результатів.

4.3 Верифікаційний розрахунок деталі з полімерного композиційного матеріалу, виготовленої з використанням методу 3D-друку

Для верифікації спочатку треба створити окремий ортотропний матеріал. Засоби аналізу Solidworks Simulation дозволяють моделювати ізотропні,

ортотропні та анізотропні матеріали користувача з повним набором властивостей для механічних розрахунків.

Модель пружного лінійного ортотропного матеріалу розроблено з урахуванням критерію руйнування максимального напруження по Мізесу. Характеристики матеріалу були задані виходячи з результатів експериментального дослідження на міцність зразків. Причому, характеристики армованого матеріалу прикладались на вісь X, що відповідає наявному однонаправленому армуванню. Характеристики на інші осі накладались з зразків без армування. Для верифікації були обрані властивості зразка з варіанта 2, як вказано в табл. 3.8, тобто – прокладання армування в кожному шарі, щільність заповнення 30%. Параметри матеріалу наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри матеріалу для верифікації

Характеристика	Значення	Од. вимір.
Модуль пружності по X	3220	МПа
Модуль пружності по Y	1550	МПа
Модуль пружності по Z	1550	МПа
Коефіцієнт Пуассона	0,31	-
Модуль зсуву	952	МПа
Масова густина	1320	кг/м ³
Межа міцності по X	56,5	МПа
Межа міцності по Y	31,4	МПа
Межа плинності	50,5	МПа

Для верифікації була побудована модель деталі типу фітинг. Ескіз деталі приведений на рис. 4.3.

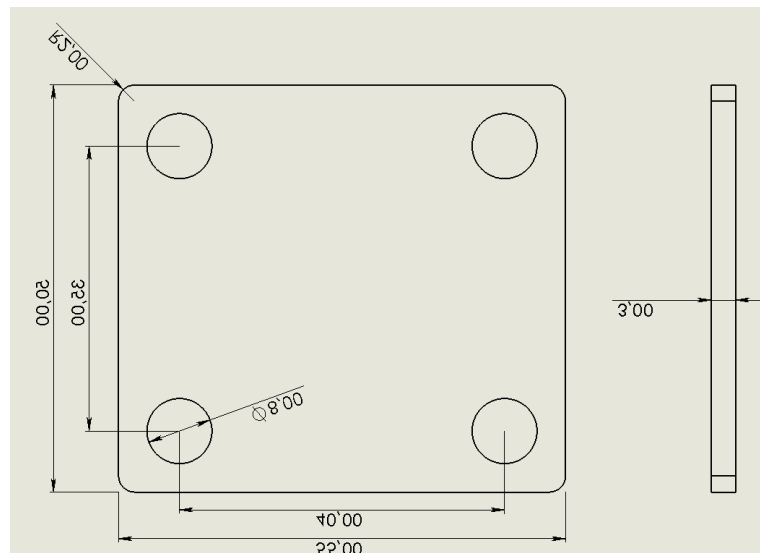


Рисунок 4.3 – Ескіз деталі

При розрахунку напрямку дії сил навантажень відповідав напрямку дії зовнішнього навантаження на деталь в процесі експлуатації, моделювання деталі і матеріалу також проводилось з врахуванням напрямку дії експлуатаційних навантажень. Алгоритм розрахунку полягає у закріпленні деталі по одній парі отворів та прикладанню сили на розтяг до другої пари отворів. Також, деталь була закріплена по одній із граней, що перпендикулярна дії сили розтягування, від переміщення вздовж грані, але не перпендикулярно їй. Це зроблене для перешкоджання руху деталі як суцільного тіла. Напрямок сили вказаний відносно умовної осі X, що відповідає осі X для характеристик матеріалу. Для більш точних результатів аналізу, за допомогою інструменту «Лінія розділу» циліндрична грань отворів була розділена на половини, для більш точного накладання закріплень та сил (рис. 4.4).

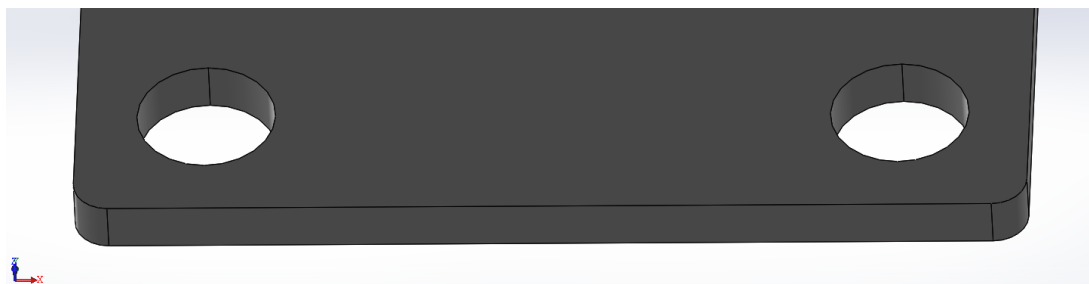


Рисунок 4.4 – Отвори з лініями розділу

По алгоритму розрахунку, аналіз проводився ітеративно. Між ітераціями збільшувалась або зменшувалась сила розтягання і контролювався запас міцності в деталі. За силу, що спричинила б руйнування деталі, була прийнята сила, при прикладенні якої коефіцієнт запасу міцності (КЗМ) становив дещо менше одиниці. Розрахунок КЗМ проводився по відношенню діючого напруження до межі міцності матеріалу. Відображення епюри КЗМ виконувалось з налаштуванням відображення відмітки мінімального запасу міцності і відображення зон КЗМ менше одиниці червоним кольором. Зміна значення сили проводилась з кроком 1 Ньютон. По результатам, коефіцієнт запасу міцності 0,9997 був досягнутий при значенні загальної сили у 639 Н. Умови навантаження, сітка та епюра результуючого КЗМ відображені на рисунках 4.5 – 4.7.

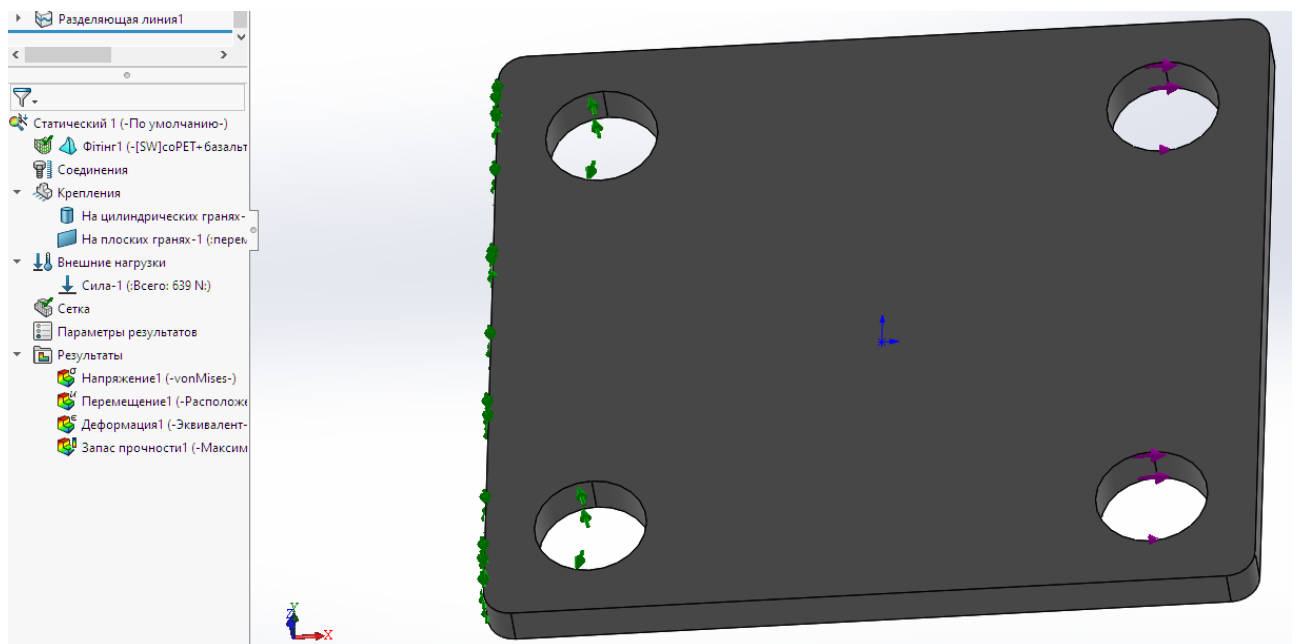


Рисунок 4.5 – Умови закріплення і навантаження

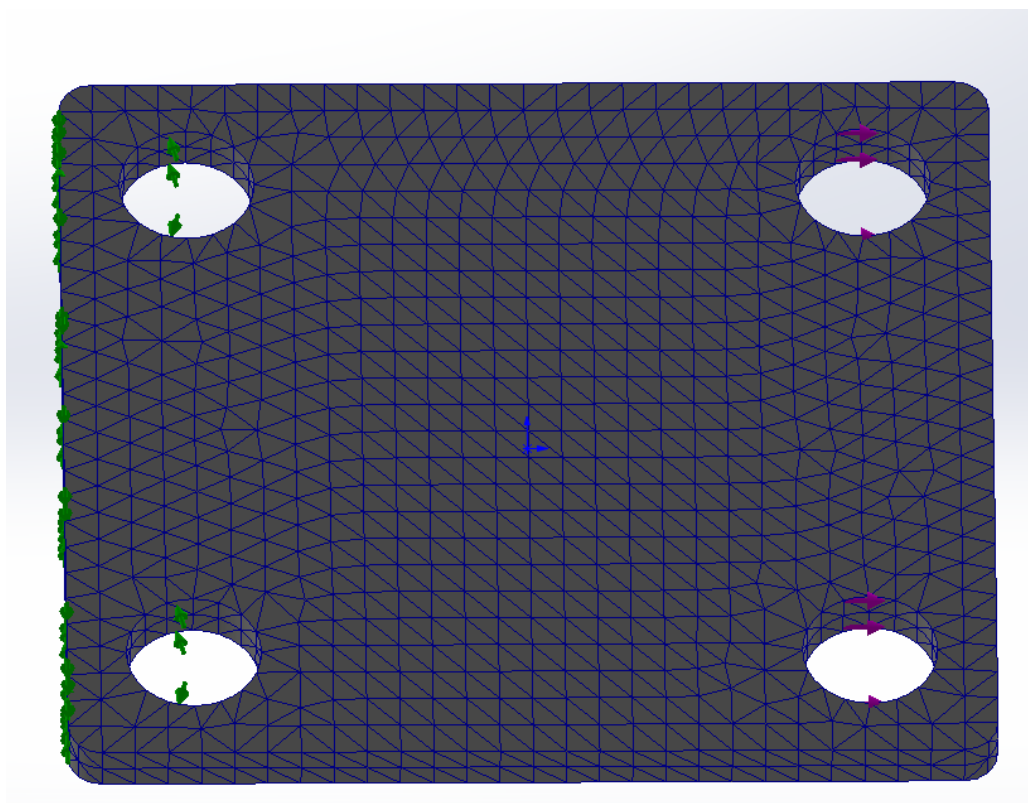


Рисунок 4.6 – Сітка

Имя модели: Фітінг1
 Название исследования: Статический 1(-По умолчанию-)
 Тип элпокры: Запас прочности Запас прочности1
 Критерий : Максимальное напряжение von Mises
 Красный < Коэффициент запаса прочности = 1 < Синий

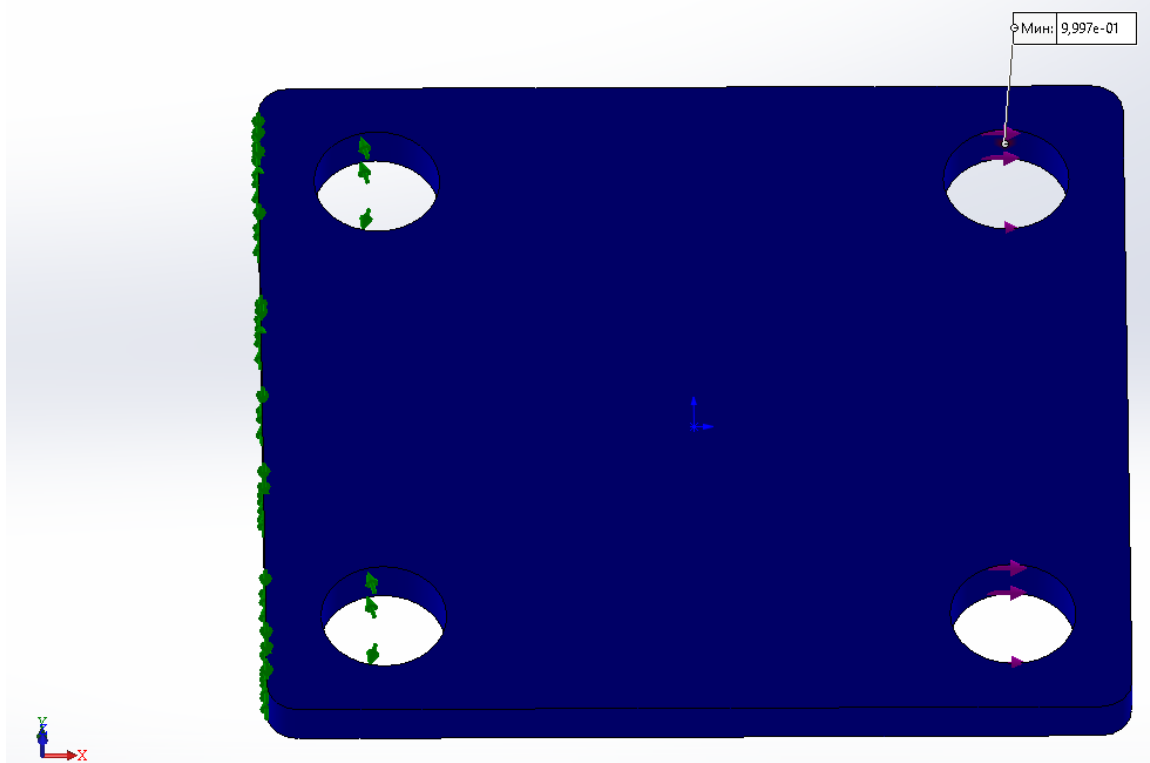


Рисунок 4.7 – Результиуюча епюра коефіцієнту запасу міцності

4.4 Виготовлення зразків для верифікації і результати

Для верифікації можливості використання моделі матеріалу та схеми армування були виготовлені 5 зразків. Налаштування технологічних параметрів 3D-друку використовувались відповідно тим, які були використані при отриманні зразків. Схема армування також відповідає схемі армування зразків на розтяг. Схема армування деталі відповідає моделі схеми армування, що була використана на етапі створення моделі та симуляції навантаження на неї. Схема армування деталі також відповідає напрямку дії експлуатаційного навантаження на деталь [98]. Тобто, напрям дії зусилля під час експлуатації співпадає з напрямом осі армування, яка являє вісь найбільшої міцності [99]. Відповідно до розміру деталі, на шар прокладалось 21 одиничне волокно. Перед виготовленням зразків з армуванням був надрукований зразок без армування для визначення положення деталі на платформі побудови для точного розташування набору волокна у технологічному пристосуванні (рис. 4.8). Один із зразків з партії представлений на рис. 4.9 та 4.10, до обрізання залишкового волокна і після.



Рисунок 4.8 – Зразок для визначення положення деталі

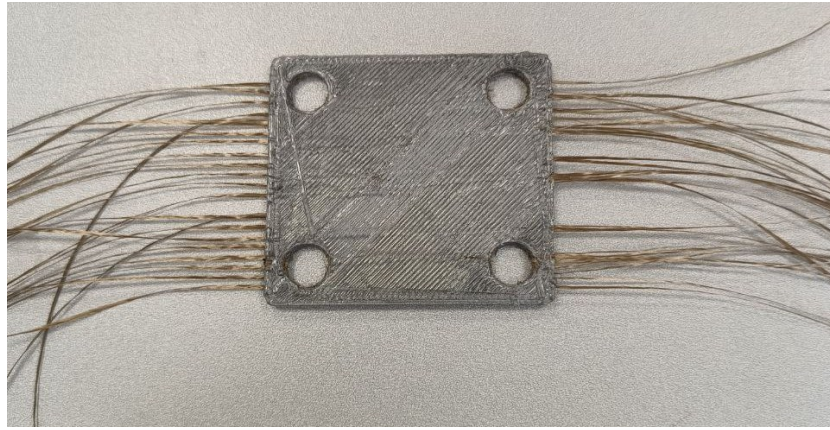


Рисунок 4.9 – Зразок з армуванням до обрізання залишків волокна



Рисунок 4.10 – Приклад зразка після обрізки залишкового волокна

Випробування зразків проводилось навантаженням силою на розтяг, по схемі аналогічній розрахунковому випадку [100]. Контроль фактичного навантаження виконувався тензометрично. Результати викладені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати випробувань верифікаційних зразків

Зразок	Розрахункове навантаження, Н	Фактичне навантаження, Н	Відхилення
1	639	557	11,3 %
2		554	13,2 %
3		570	10,8 %
4		575	10,1 %

5		558	12,6 %
---	--	-----	--------

4.5 Висновки до розділу

Для розрахунку деталі для підтвердження можливості використання результатів експериментального дослідження полімерного композиційного матеріалу, що отриманий способом 3D-друку, було проведено моделювання деталі. Модель деталі була створена з врахуванням напрямку дії експлуатаційних навантажень. Модель матеріалу, що була створена на основі експериментальних результатів, також прикладалась до деталі з врахуванням напрямку дійсних експлуатаційних навантажень, для співпадіння осі армування з напрямком експлуатаційних навантажень.

Аналіз та симуляція навантажень засобами САЕ також проводились з врахуванням реальної дії навантажень. Для цього в моделі деталі були внесені зміни для більш точної симуляції навантаження – додані лінії розділу по отворам, які сприймають на собі навантаження в контакті з іншими деталями та кріпильними виробами. Це збільшує точність симуляції дії навантаження через відсутність фантомних напружень у частині отвору, яка при експлуатації не навантажена.

Виходячи з результатів, зразки деталей довільної форми, армовані волокном, показали відхилення сили на розрив від 10,1 до 13,2 %, середнє відхилення по 5 зразкам – 11,9%. Похибка складає в середньому не більше 12%, що відповідає прийнятим припущенням для інженерних розрахунків. Це показує, що, при дотриманні технологічних прийомів армування, результати випробувань на міцність верифіковано. Створений матеріал у модулі САЕ Solidworks Simulation може бути накладений на інші деталі, що виготовляються і армуються за даною схемою і методом армування, для аналізу і прогнозування їх поведінки під зовнішніми навантаженнями та відповідності їм. Матеріали для САЕ-аналізу повинні відповідати параметрам,

що були отримані під час експериментального дослідження для кожного виду армування та налаштувань технологічних параметрів 3D-друку.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

У процесі дослідження було розглянуто поточний стан пошарового синтезу виробів з полімерних композиційних матеріалів. Основним недоліком було прийнято недотримання суцільності армуючого волокна в межах шару та неможливість точно та вибірково контролювати положення армуючого волокна в межах шару.

Досліджено вплив технологічних параметрів на експлуатаційні властивості виробів з полімерних композиційних матеріалів, що отримані методами пошарового синтезу. Так, встановлено, що відстань між шарами армування є значущим та основним фактором впливу на кінцеві характеристики отриманих виробів. Встановлена пряма залежність між зменшенням відстані між армованими шарами та збільшення властивостей міцності виробу. Тобто, деталі з армуванням в кожному шарі міцніші, ніж з армуванням через шар чи два.

Обґрунтування вибору основного матеріалу полімеру та матеріалу армування проведено відповідно до критеріїв мінімізації впливу технологічних недоліків та можливості експериментального проведення армування. Так, у якості основного матеріалу був обраний представник стандартних полімерів, соРЕТ, а в якості волокна армування – базальтове волокно. Вони були обрані через їх високі механічні властивості без значних технологічних недоліків та негативних особливостей їх використання для отримання деталей з полімерного композиційного матеріалу способом 3D-друку.

Для виконання розробленого методу армування було створено технологічне оснащення, що встановлюється на 3D-принтер. Для цього спочатку був проведений аналіз кінематичних схем поширених моделей та типів FDM/FFF 3D-принтерів. Основною перевагою для використання тої чи іншої кінематики визначено нерухомість платформи побудови, відсутність рухомих елементів конструкції навколо платформи побудови та зверху неї. Цим вимогам найбільш відповідала кінематика типу Delta. Для встановлення

на принтер з такою кінематикою було розроблене технологічне оснащення, що виконує завдання по утриманню волокна, задання йому позиції відносно деталі та платформи побудови і утриманню цієї позиції набору армуючого волокна. Технологічне оснащення дозволяє виконувати однонаправлене армування деталей.

Досліджено вплив параметрів 3D-друку на властивості отриманого матеріалу. Так, хоча основним фактором впливу на характеристики виробу є відстань між шарами волокна армування, щільність структур заповнення також впливає на міцність та модуль пружності матеріалу. Було встановлено пряму залежність між збільшенням щільності заповнення та підвищенням механічних характеристик матеріалу.

Розроблено раціональні схеми отримання виробів з полімерних композиційних матеріалів з використанням методу 3D-друку. Розроблена схема армування, що дозволяє зберігати суцільність волокна не лише в межах шару, а і при переході між шарами. Схема армування дозволяє позитивно впливати на властивості матеріалу з урахуванням напрямку дії експлуатаційних навантажень, а режими друку забезпечують надійне та достатнє закріплення і зчеплення волокна армування з основним полімером полімерного композиційного матеріалу.

Встановлено, що за раціональних умов армування та режимів друку, в порівнянні з референсним зразком, межа міцності збільшується на 81%, до 57,1 МПа, межа плинності – на 95% до 51,5 МПа, а модуль пружності – на 109% до 3,24 ГПа. Визначено залежності властивостей матеріалу від відстані між шарами армування та щільністю заповнення. Для результатів були побудовані апроксимаційні рівняння, проведено порівняння результатів з базовим (референтним) зразком. Ці рівняння апроксимаційних функцій дозволяють прогнозувати експлуатаційні властивості виробу в заданих діапазонах. Варто зазначити, що ці залежності справедливі лише для полімерного композиційного матеріалу, отриманого без зміни інших параметрів армування і 3D-друку.

Проведено моделювання композиційного матеріалу і виробу з урахуванням реальних умов експлуатації. Потреба у цьому пов'язана з тим, що експлуатаційні властивості деталі, отриманої з використанням методу 3D-друку, залежать не лише від властивостей матеріалу, а й від геометрії деталі та напрямків впливу навантажень на неї. Методами твердотільного моделювання та симуляції методом скінченних елементів змодельована деталь з урахуванням реальних умов експлуатації. Матеріал, що був також вкладений в модель деталі, отриманий на основі експериментальних досліджень зразків полімерного композиційного матеріалу, отриманого з використанням розробленого методу армування. Матеріал і модель його накладання на деталь також відповідають реальним умовам експлуатації. Використовуючи САЕ модуль програмного забезпечення Solidworks, була проведена поетапна симуляція навантаження на деталь з метою визначення зусилля, при якому відбувається руйнування деталі. Були виготовлені деталі-зразки для випробувань, з режимами синтезу та схемою армування, що відповідає розрахунковій моделі. В результаті випробувань деталей-зразків виявлена доволі точна відповідність експериментальних значень сили руйнування до розрахункових.

Проведене дисертаційне дослідження як результат отримало новий метод армування волокном полімерних виробів, створюючи різновид полімерного композиційного матеріалу. Розроблена схема та метод армування, а також спосіб розрахунку кінцевих параметрів деталей і виробі мають значне практичне значення і можуть бути впроваджені для виготовлення деталей для ракетно-космічної та авіаційної техніки з метою покращення масової досконалості конструкції за рахунок покращених питомих властивостей міцності.

Практична цінність дослідження полягає у наступному:

- розроблена схема і метод армування виробів волокном при використанні FDM/FFF 3D-друку, з описом впливу технологічних параметрів друку та рекомендацій щодо їх вибору, розроблено технологічне оснащення

для армування, що встановлюється на 3D-принтер з кінематикою типу Delta і прийоми виконання армування;

- запропоновано та обґрунтовано методику механічних випробувань полімерних композиційних матеріалів з шароватою структурою, що отримані методом 3D-друку;

- результати дослідження впроваджені в освітній процес Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара та Національного центру аерокосмічної освіти молоді імені О.М. Макарова (акти впровадження прикладені в додатках А і Б).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Composite Materials: Driving 3D Printing to End-Use, Mass Production Parts. *All3DP*. URL: <https://all3dp.com/4/composite-materials-driving-3d-printing-to-end-use-mass-production-parts/> (дата звернення 20.05.2025)
2. Що таке технологія 3D-друку на основі смоли: SLA, DLP та LCD? *Artlineua*. URL: <https://artline.ua/uk/blogs/chto-takoe-tekhnologiya-3d-pechati-na-osnove-smoly-sla-dlp-i-lcd> (дата звернення 24.05.2025)
3. SLA vs DLP 3D-друк. *3D WAY*. URL: <https://3dway.com.ua/blog/sla-vs-dlp-3d-printing> (дата звернення 24.05.2025)
4. У чому різниця між технологіями 3D-друку FDM и Polyjet? *3Dprintua*. URL: <https://www.3dprint.ua/single-post/fdm-and-polyjet-3d-printing> (дата звернення 20.05.2025)
5. US Marines Saved \$70,000 by 3D Printing Small F-35 Aircraft Component. *All3DP*. URL: <https://all3dp.com/4/us-marines-saved-70000-3d-printing-small-f-35-aircraft-component/> (дата звернення 24.05.2025)
6. 3D Printing in Aerospace: Materials, Processes, and Classifications. *Xometry*. URL: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/3d-printing-in-aerospace/> (дата звернення 20.05.2025)
7. High-Precision 3d Printing In Aerospace Parts Manufacturing. *AIP Precision Machining*. URL: <https://aipprecision.com/high-precision-3d-printing-in-aerospace-parts-manufacturing/> (дата звернення 24.05.2025)
8. Royal Navy Test Launches 3D Printed Drone At Sea. *All3DP*. URL: <https://all3dp.com/royal-navy-launches-3d-printed-drone/> (дата звернення 20.05.2025)
9. Alami, A. H., Ghani Olabi, A., Alashkar, A., Alasad, S., Aljaghoub, H., Rezk, H., & Abdelkareem, M. A. (2023). Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: Recent trends and role in achieving sustainable development goals. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(11), 102516. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102516>

10. 3D printing filaments for industrial use: short guide. *3DGENCE*. URL: <https://www.3dgence.com/america/3dnews/3d-printing-filaments-for-industrial-use-short-guide/> (дата звернення 20.05.2025)
11. Khouri, N. G., Bahú, J. O., Blanco-Llamero, C., Severino, P., Concha, V. O. C., & Souto, E. B. (2024). Polylactic Acid (PLA): Properties, Synthesis, and Biomedical Applications - A Review of the Literature. *Journal of Molecular Structure*, 138243. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.138243>
12. ABS натуральний. *Monofilament*. URL: <https://monofilament.com.ua/ua/products/standartnye-materialy/abs/abs-plastic> (дата звернення 28.05.2025)
13. coPET прозорий. *Monofilament*. URL: <https://monofilament.com.ua/ua/products/standartnye-materialy/copet/copet-naturalnyj-175-ves-05-kg> (дата звернення 28.05.2025)
14. Натуральний MBS. *Monofilament*. URL: <https://monofilament.com.ua/ua/products/standartnye-materialy/mbs/mbs-naturalnyj-o1-75mm-ves0-125kg> (дата звернення 28.05.2025)
15. Натуральний SAN. *Monofilanet*. URL: <https://monofilament.com.ua/ua/products/standartnye-materialy/san/san-naturalnyj-o1-75mm-ves0-5kg> (дата звернення 28.05.2025)
16. L. Hýlová et al (2018) Mechanical Properties Study of High Impact Polystyrene Under Impact and Static Tests. 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 448 012044. DOI: 10.1088/1757-899X/448/1/012044
17. Lepoittevin, B., & Roger, P. (2011). Poly (ethylene terephthalate). *Handbook of engineering and speciality thermoplastics*, 3, 97-126.
18. Bahar, Anis & Belhabib, Sofiane & Guessasma, Sofiane & Benmahiddine, Ferhat & Hamami, Ameer El Amine & Belarbi, Rafik. (2022). Mechanical and Thermal Properties of 3D Printed Polycarbonate. *Energies*. 15. 3686. 10.3390/en15103686.

19. Farina, Ilenia & Singh, Narinder & Colangelo, Francesco & Luciano, Raimondo & Bonazzi, Giulio & Fraternali, Fernando. (2019). High-Performance Nylon-6 Sustainable Filaments for Additive Manufacturing. *Materials*. 12. 3955. 10.3390/ma12233955.
20. Nylon 66 Technical Properties Data Sheet. *Theplasticshop*. URL: https://www.theplasticshop.co.uk/plastic_technical_data_sheets/nylon_66_technical_data_sheet.pdf (дата звернення 28.05.2025)
21. ASA натуральний. *Monofilament*. URL: <https://monofilament.com.ua/ua/products/inzhinernye-plastiki/asa-plastic/asa-filament> (дата звернення 28.05.2025)
22. PEI technical data sheet. *Plastuim*. URL: <https://plastim.co.uk/wp-content/uploads/2020/04/PEI-Technical-Data-Sheet.pdf> (дата звернення 28.05.2025)
23. PEEK Data Sheet. *directplastics*. URL: <https://www.directplastics.co.uk/pdf/datasheets/PEEK%20Data%20Sheet.pdf> (дата звернення 28.05.2025)
24. Data sheet PEKK. *ALM - Advanced Laser Materials*. URL: <https://www.advancedlasermaterials.com/wp-content/uploads/2024/08/ALM-Material-Data-Sheet-PEKK-100.pdf> (дата звернення 29.05.2025)
25. Mason, H., Gardiner, G. (2022, July 13) 3D printing with continuous fiber: A landscape. *CompositesWorld*. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/3d-printing-with-continuous-fiber-a-landscape> (дата звернення 20.05.2025)
26. Windform LX 3.0 composites contribute to OreSat0 CubeSat deployment. *CompositesWorld*. URL: <https://www.compositesworld.com/news/windform-lx-30-composites-contribute-to-oresat0-cubesat-deployment> (дата звернення 20.05.2025)
27. Weber State applies composite-based 3D printing for aerospace support, research. *CompositesWorld*. URL:

- <https://www.compositesworld.com/news/weber-state-applies-composite-based-3d-printing-for-aerospace-support-research> (дата звернення 20.05.2025)
28. Matschinski, A. (2020). Integration of continuous fibers in additive manufacturing processes. In *Virtual Symposium on AFP and AM*. Technical University of Munich and Australian National University: Canberra, Australia.
 29. Mashayekhi, F., Bardon, J., Berthé, V., Perrin, H., Westermann, S., & Addiego, F. (2021). Fused Filament Fabrication of Polymers and Continuous Fiber-Reinforced Polymer Composites: Advances in Structure Optimization and Health Monitoring. *Polymers*, 13(5), 789. <https://doi.org/10.3390/polym13050789>
 30. Matsuzaki, R., Ueda, M., Namiki, M., Jeong, T. K., Asahara, H., Horiguchi, K. & Hirano, Y. (2016). Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation. *Scientific reports*, 6(1), 23058.
 31. Dickson, A. N., Barry, J. N., McDonnell, K. A., & Dowling, D. P. (2017). Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 16, 146-152.
 32. Safari F, Kami A, Abedini V. 3D printing of continuous fiber reinforced composites: A review of the processing, pre- and post-processing effects on mechanical properties. *Polymers and Polymer Composites*. 2022;30. doi:10.1177/09673911221098734
 33. T.H.J. Vaneker. Material Extrusion of Continuous Fiber Reinforced Plastics Using Commingled Yarn. *Procedia CIRP*. Volume 66. 2017. Pages 317-322. ISSN 2212-8271. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.367>.
 34. M.S. Kamer, Ş Temiz, D.H. Yaykaşlı, A. Kaya, and O. Akay, 3B Yazıcıda Farklı Yazdırma Hızlarında ABS ve PLA Malzeme İle Üretilen Çekme Test Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması (Comparison of Mechanical Properties of Tensile Test Specimens Produced

- with ABS and PLA Material at Different Printing Speeds in 3D Printer), Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2022, Vol. 37, P. 1197–1211. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.961981>.
35. Rani G. E. Quantitative assessment of particle dispersion in polymeric composites and its effect on mechanical properties / Rani G. E. [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – Vol. 19. – P.1836-1845.
36. Malik Abdul Karim, Mohamad Zaki Abdullah, Ahmed Farouk Deifalla, Marc Azab, Ahsan Waqar (2023). An assessment of the processing parameters and application of fibre-reinforced polymers (FRPs) in the petroleum and natural gas industries: A review, Results in Engineering, Volume 18, 2023, 101091, ISSN 2590-1230, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101091>.
37. Mei, H., Ali, Z., Ali, I., & Cheng, L. (2019). Tailoring strength and modulus by 3D printing different continuous fibers and filled structures into composites. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2, 312-319.
38. Etcheverry, M., & Barbosa, S. E. (2012). Glass fiber reinforced polypropylene mechanical properties enhancement by adhesion improvement. *Materials*, 5(6), 1084-1113. <https://doi.org/10.3390/ma5061084>
39. Prashanth, S., Subbaya, K. M., Nithin, K., & Sachhidananda, S. (2017). Fiber reinforced composites-a review. *J. Mater. Sci. Eng*, 6(03), 2-6. <https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000341>
40. Wallenberger, F. T., Watson, J. C., & Li, H. (2001). Glass fibers. In *Composites* (pp. 27-34). ASM International. <https://doi.org/10.1002/9783527629848.ch7>
41. Cevahir, A. (2017). Glass fibers. In *Fiber technology for fiber-reinforced composites* (pp. 99-121). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101871-2.00005-9>

42. Analysis of Mechanical Behavior of Glass Fibre/ Al₂O₃-SiC Reinforced Polymer Composites / S. Rajesh [et al.] // *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 97. – P. 598–606.
43. Ghaffari, S., Makeev, A., Seon, G., Cole, D. P., Magagnosc, D. J., & Bhowmick, S. (2020). Understanding compressive strength improvement of high modulus carbon-fiber reinforced polymeric composites through fiber-matrix interface characterization. *Materials & Design*, 193, 108798. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108798>
44. Amran, Y. M., Alyousef, R., Rashid, R. S., Alabduljabbar, H., & Hung, C. C. (2018, November). Properties and applications of FRP in strengthening RC structures: A review. In *Structures* (Vol. 16, pp. 208-238). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.09.008>
45. Ozkan, D., Gok, M. S., & Karaoglanli, A. C. (2020). Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite materials, their characteristic properties, industrial application areas and their machinability. *Engineering Design Applications III: Structures, Materials and Processes*, 235-253.
46. Naito, K., Tanaka, Y., Yang, J. M., & Kagawa, Y. (2008). Tensile properties of ultrahigh strength PAN-based, ultrahigh modulus pitch-based and high ductility pitch-based carbon fibers. *Carbon*, 46(2), 189-195.
47. Soares, B., Preto, R., Sousa, L., & Reis, L. (2016). Mechanical behavior of basalt fibers in a basalt-UP composite. *Procedia Structural Integrity*, 1, 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.02.012>
48. Jamshaid, H., Militký, J., Mishra, R., & Koukolikova, L. (2017). Basalt fibers and their composites. *Novelties in Fibrous Material Science*, 2.
49. De Fazio, P. (2011). Basalt fiber: From earth an ancient material for innovative and modern application. *Energia, Ambientee Innovazione*, 3, 89-96.
50. Sim, J., & Park, C. (2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Composites Part B: Engineering*, 36(6-7), 504-512. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2005.02.002>

51. Lu, Z., & Xian, G. (2018). Resistance of basalt fibers to elevated temperatures and water or alkaline solution immersion. *Polymer Composites*, 39(7), 2385-2393.
52. Wu, G., Wang, X., Wu, Z., Dong, Z., & Zhang, G. (2015). Durability of basalt fibers and composites in corrosive environments. *Journal of Composite Materials*, 49(7), 873-887. <https://doi.org/10.1177/0021998314526628>
53. Russo, P., Simeoli, G., Cimino, F., Papa, I., Ricciardi, M. R., & Lopresto, V. (2019). Impact damage behavior of vinyl ester-, epoxy-, and nylon 6-based basalt fiber composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28, 3256-3266. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04037-8>
54. Polymer composite materials: A comprehensive review / Rachid Hsissou [et al.] // Composite Structures. – 2021. – Vol. 262. – P. 113640
55. Tian, X., Liu, T., Yang, C., Wang, Q., & Li, D. (2016). Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 88, 198-205.
56. Hagstrand, P. O., Bonjour, F., & Månson, J. A. (2005). The influence of void content on the structural flexural performance of unidirectional glass fibre reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36(5), 705-714.
57. Mosleh, N., Rezadoust, A. M., & Dariushi, S. (2021). Determining process-window for manufacturing of continuous carbon fiber-reinforced composite Using 3D-printing. *Materials and Manufacturing Processes*, 36(4), 409-418.
58. Luo, H., Tan, Y., Zhang, F., Zhang, J., Tu, Y., & Cui, K. (2019). Selectively enhanced 3D printing process and performance analysis of continuous carbon fiber composite material. *Materials*, 12(21), 3529.
59. R.J. Zaldivar, D.B. Witkin, T. McLouth, D.N. Patel, K. Schmitt, J.P. Nokes, Influence of processing and orientation print effects on the mechanical and thermal behavior of 3D-Printed ULTEM® 9085 Material, Additive

- Manufacturing, Volume 13, 2017, Pages 71-80, ISSN 2214-8604, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.11.007>.
60. Berin Šeta, Michael Sandberg, Marco Brander, Md Tusher Mollah, Deepak Pokkalla, Vipin Kumar, Jon Spangenberg, Modeling fiber orientation and strand shape morphology in three-dimensional material extrusion additive manufacturing, *Composites Part B: Engineering*, Volume 266, 2023, 110957, ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110957>.
 61. New approach to production of fiber reinforced polymer hybrid composites / Victor Beloshenko [et al.] // *Composites Part B: Engineering*. – 2017. – Vol. 112. – P. 22–30.
 62. Sajan S. A review on polymer matrix composite materials and their applications / S. Sajan, D. Philip Selvaraj // *Materials Today: Proceedings*. – 2021.
 63. Prajapati, A. R., Dave, H. K., & Raval, H. K. (2021). Effect of fiber reinforcement on the open hole tensile strength of 3D printed composites. *Materials Today: Proceedings*, 46, 8629-8633.
 64. Ribeiro, T. F. R., Campilho, R. D. S. G., Pinto, R. F. R., & Rocha, R. J. B. (2025). Scarf Adhesive Bonding of 3D-Printed Polymer Structures. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(4), 115. <https://doi.org/10.3390/jmmp9040115>
 65. Yee Ling Yap, William Toh, Rahul Koneru, Rongming Lin, Keen Ian Chan, Huanyu Guang, Wai Yew Brian Chan, Soo Soon Teong, Guoying Zheng, Teng Yong Ng. Evaluation of structural epoxy and cyanoacrylate adhesives on jointed 3D printed polymeric materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Volume 100, 2020, 102602, ISSN 0143-7496, <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102602>
 66. Basalt-Filled Epoxy Composite Materials [Electronic resource] / S. V. Ulegin [et al.] // *International Polymer Science and Technology*. – 2014. – Vol. 41, no. 5. – P. 57–60.

- 67.Руйнуючий та ушкоджуючий контроль. ЗНУ. URL:
https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/887971/mod_resource/content/1/%D1%80%D1%83%D0%B9%D0%BD%D1%96%D0%B2%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BB%D1%8C.pdf (дата звернення 18.05.2025).
- 68.ДСТУ EN 10002-1:2006. Матеріали металеві. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури (EN 10002-1:2001, IDT). [Чинний від 2005-04-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2008. 39 с.
- 69.ДСТУ ISO 7438:2005. Матеріали металеві. Випробування на згин. (ISO 7438:1985, IDT). [Чинний від 2007-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. 10 с.
- 70.Kaelble, D. H. Quality control and nondestructive evaluation techniques for composites - Part 1: overview of characterization techniques for composite reliability. US Army Aviation Research and Development Command, 1982. 67 с.
- 71.What are the Different Inspection Methods of Non-destructive Testing for Composites? *Addcomposites*. URL:
<https://www.addcomposites.com/post/non-destructive-testing-for-composites-different-inspection-methods> (дата звернення 10.12.2024).
- 72.Guidelines for Analysis, Testing, and Nondestructive Inspection of ImpactDamaged Composite Sandwich Structures : Final Report / P. Shyprykevich та ін. ВАШИНГТОН : U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration Office of Aviation Research, 2003. 94 с.
- 73.Gary Mac та ін. Application of micro-computed tomography for authentication of 3D printed composite parts. Additive Manufacturing Letters. 2022. Vol. 3. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2022.100104>
- 74.Inspecting FDM 3D prints with industrial CT. Lumafield. URL:
<https://www.lumafield.com/article/x-ray-ct-fdm-fused-deposition-modeling-3d-print> (дата звернення 14.12.2024)

- 75.S. Gholizadeh. A review of non-destructive testing methods of composite materials. *Procedia Structural Integrity*. 2016. Vol. 1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.02.008>
- 76.Jakub Pernica, Michal Sustr, Petr Dostal, Martin Brabec, David Dobrocky. Tensile Testing of 3D Printed Materials Made by Different Temperature. *Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 21, no. 3. DOI: 10.21062/mft.2021.039
- 77.H. Gonabadi, A. Yadav, S. J. Bull. The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of PLA produced by a 3D FFF printer. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06138-4>
- 78.Chamil Abeykoon, Pimpisut Sri-Amphorn, Anura Fernando. Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.03.003>
- 79.Chen, W., Zhang, Q., Cao, H., & Yuan, Y. (2021). Process evaluation, tensile properties, mathematical models, and fracture behavior of 3D printed continuous fiber reinforced thermoplastic composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 40(21-22), 845-863.
- 80.Tugce Tezel, Murat Ozenc, Volkan Kovan. Impact properties of 3D-printed engineering polymers. *Materials Today Communications*. 2021. Vol. 26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102161>
- 81.Jens Baaran. *Visual Inspection of Composite Structures*. DLR Braunschweig, 2009. 114 с.
- 82.Приготовление образцов для металлографического исследования микроструктуры Методические материалы к выполнению лабораторных работ по металлографии: навчальний посібник / С.В. Литовченко, В.Г. Кириченко, Е.А. Доценко, С.Ю. Кочетова. Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2012. 18 с.

83. Prajapati, A. R., Dave, H. K., & Raval, H. K. (2021). An experimental study on mechanical, thermal and flame-retardant properties of 3D-printed glass-fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 5266-5277.
84. Rietema, M. J. (2015). *Design of a prototype machine for 3D printing with continuous fibre reinforcement* (Master's thesis, University of Twente).
85. Sørensen, Bent & Lilholt, H. (2016). Fiber pull-out test and single fiber fragmentation test - analysis and modelling. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 139.012009.10.1088/1757-899X/139/1/012009.
86. Krajangsawasdi, N., Blok, L. G., Hamerton, I., Longana, M. L., Woods, B. K., & Ivanov, D. S. (2021). Fused deposition modelling of fibre reinforced polymer composites: a parametric review. *Journal of Composites Science*, 5(1), 29.
87. Pandelidi, C., Bateman, S., Piegert, S., Hoehner, R., Kelbassa, I., & Brandt, M. (2021). The technology of continuous fibre-reinforced polymers: a review on extrusion additive manufacturing methods. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113, 3057-3077.
88. Kampker, Achim & Triebs, Johannes & Kawollek, Sebastian & Ayvaz, Peter & Hohenstein, Steffen. (2019). Review on Machine Designs of Material Extrusion based Additive Manufacturing (AM) Systems - Status-Quo and Potential Analysis for Future AM Systems. *Procedia CIRP*. 81. 815-819.10.1016/j.procir.2019.03.205.
89. Marghitu, D. B. (2005). *Kinematic chains and machine components design*. Gulf Professional Publishing.
90. Daouda Nikiema, Ndèye Awa Sène, Pascale Balland, Alain Sergent (2023). Study of walls' influence on the mechanical properties of 3D printed onyx parts: Experimental, analytical and numerical investigations, *Heliyon*, Volume 9, Issue 8, 2023, e19187, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19187>.

- 91.L. Távara, C. Madrigal, M.T. Aranda, J. Justo. (2023) Anisotropy and ageing effect on the mechanical behaviour of 3D-printed short carbon-fibre composite parts, *Composite Structures*, Volume 321, 2023, 117196, ISSN 0263-8223, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117196>.
- 92.Li, N., Li, Y., & Liu, S. (2016). Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing. *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 218-225.
- 93.Melenka, G. W., Cheung, B. K., Schofield, J. S., Dawson, M. R., & Carey, J. P. (2016). Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures. *Composite Structures*, 153, 866-875.
- 94.Метод конечных элементов: теория, алгоритмы, реализация / В.А.Толок [и др.]. К.: Наук. думка, 2003. 316 с.
- 95.Єршов С. В. Методи аналізу, моделювання та оптимізації процесів ОМТ: монографія. Кам'янське, 2016. 61 с.
- 96.Карпіловський В.С. [Метод скінченних елементів і задачі теорії пружності](#). – Київ: «Софія А», 2022. – 275 с. [ISBN 978-617-7031-87-0](#).
97. Єременко С. Ю. Методи кінцевих елементів в механіці деформованих тіл: монографія. Харків, 1991. 272 с.
- 98.Bondarenko, O., Vekilov, S., Tkachov, Y., & Marchan, R. (2021). Topology optimization features of liquid-propellant rocket engine power elements manufactured by additive technologies. *Journal of Rocket-Space Technology*, 29(4), 106-111. <https://doi.org/10.15421/452111>
- 99.Nizam, Mohd & Ismail, Khairul & YAP, Tze Chuen. (2022). The Effect of Printing Orientation on the Mechanical Properties of FDM 3D Printed Parts. 10.1007/978-981-19-2890-1_8.
100. Oh J-S, Oh M-J, Han Z, Seo H-S. Effects of Fiber Orientation on the Bearing Strength of 3D-Printed Composite Materials Produced by Fused Filament Fabrication. *Polymers*. 2024; 16(24):3591. <https://doi.org/10.3390/polym16243591>

ДОДАТОК А

Список опублікованих праць за темою дисертації

Публікації у фахових виданнях України категорії Б:

Сіренко, М., & Карпович, О. (2023). Перспективи розвитку 3d-друку виробів у авіаційній та ракетно-космічній галузі із полімерних матеріалів з композиційним армуванням. *Journal of Rocket-Space Technology*, 30(4), 9-14. <https://doi.org/10.15421/452202> (особистий внесок Сіренка М.К.: огляд методів друку та матеріалів; особистий внесок Карпович О.В.: формулювання і постановка мети дослідження, формулювання висновків)

Сіренко, М., & Карпович, О. (2023). Моделювання вузла подавання армуючого волокна при 3d-друку виробів із полімерних матеріалів з композиційним армуванням у авіаційній та ракетно-космічній галузі. *Journal of Rocket-Space Technology*, 31(4), 116-120. <https://doi.org/10.15421/452315> (особистий внесок Сіренка М.К.: аналіз тяглових вузлів для подачі волокна, розробка та створення моделі вузла подачі; особистий внесок Карпович О.В.: формулювання висновків, проведення експериментальних досліджень)

Сіренко, М., & Карпович, О. (2024). Методи контролю якості деталей РКЛА, що виготовлені методом 3d-друку з композиційних полімерних матеріалів. *Journal of Rocket-Space Technology*, 33(4-27), 55-61. <https://doi.org/10.15421/452408> (особистий внесок Сіренка М.К.: аналіз методів контролю та аналізу, формулювання висновків; особистий внесок Карпович О.В.: постановка задачі дослідження)

Сіренко, М., & Карпович, О. (2025). Експериментальне дослідження міцносних характеристик деталей армованих композиційним волокном. *Journal of Rocket-Space Technology*, 34(1), 31-38. <https://doi.org/10.15421/452503> (особистий внесок Сіренка М.К.: розробка схеми армування, розробка та виготовлення технологічного обладнання, виготовлення зразків для випробувань, проведення випробувань; особистий внесок Карпович О.В.: постановка задачі дослідження, обробка експериментальних результатів)

Апробації на конференціях:

М.К. Сіренко, О.В. Карпович. Розробка способу пошарового армування волокном деталей РКЛА при FFF 3d-друці // *XXV Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина І Космос»*. Збірник тез. – 2023. С. 205.

М.К. Сіренко, О.В. Карпович, Н.С. Носкова. Розробка вузла подавання армуючого волокна при FDM 3D-друці виробів для РКЛА // *XXVI Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина І Космос»*. Збірник тез. – 2024. С. 232.

М.К. Сіренко, О.В. Карпович. Методи наповнення композиційним волокном деталей РКЛА, що були отримані методами адитивного виробництва. // *XXVII Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина І Космос»*. Збірник тез. – 2025. С. 280.

Sirenko, M., & Karpovych, O. (2023). Improvement of the reinforcing fiber feed node for 3D printing of composite-reinforced products. *Challenges and Issues of Modern Science*, 1, 160-164. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/31>

Sirenko, M., & Karpovych, O. (2024). Improvement of reinforcement technique of parts with composite fiber in FDM 3D-printing. *Challenges and Issues of Modern Science*, 2, 148-152. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/170>

ДОДАТОК Б

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. проректора з науково-педагогічної роботи
Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара
професор

Наталія ГУК
« 08 » 04 2025 р.

АКТ

впровадження дисертаційного дослідження аспіранта PhD Сіренка Максима Костянтиновича «Розробка та вдосконалення технології пошарового синтезу виробів з полімерних композиційних матеріалів для авіаційної та ракетно-космічної техніки» у навчальний процес Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара

Комісія Фізико-технічного факультету Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара у складі голови – декана професора Саніна А.Ф. та членів комісії: в.о. завідувача кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій, кандидата технічних наук, доцента Карповича І.І. та кандидата технічних наук, доцента Бондаренка О.В. констатує, що результати досліджень і розробок, які відображені у дисертаційній роботі Сіренка Максима Костянтиновича «Розробка та вдосконалення технології пошарового синтезу виробів з полімерних композиційних матеріалів для авіаційної та ракетно-космічної техніки», використовуються при проведенні лекційних, практичних та лабораторних занять що викладаються у відповідності з навчальними планами дисциплін «Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів», «Інженерні розрахунки в CAD/CAE системах», «Технологія виробництва твердопаливних двигунів», «Технології 3D-друку для синтезу деталей ракетно-космічної техніки», «Технологія виробництва та обробки матеріалів» а також при підготовці дипломних та курсових робіт студентів спеціальності 134 – «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» та 132 – «Матеріалознавство».

Автором вирішені науково-практичні завдання з розробки технології отримання виробів з полімерних композиційних матеріалів з використанням методу 3d-друку, розробки методики механічних випробувань композиційних матеріалів з шароватою структурою, що отримані методами 3d-друку, та розробці методу дослідження впливу параметрів армування на експлуатаційні властивості деталей та виробів з полімерних композиційних матеріалів.

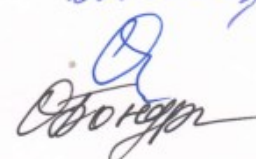
Застосування вказаних розробок в навчальному процесі дозволило розширити тематичний склад означених курсів питаннями отримання виробів з полімерних композиційних матеріалів методами 3d-друку.

Голова комісії



Анатолій САНІН

Члени комісії:



Іван КАРПОВИЧ



Олег БОНДАРЕНКО

ДОДАТОК В

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ЦЕНТР
АЕРОКОСМІЧНОЇ ОСВІТИ МОЛОДІ ім. О.М. Макарова
(НЦАОМ ім. О.М. Макарова)**

пр. Науки, 26, м. Дніпро, 49005; тел. (056)7135756,
E-mail: ncaomu@email.dp.ua; сайт: www.unaee.dp.ua; код ЄДРПОУ 2422879

ЗАТВЕРДЖУЮ
Генеральний директор
Національного центру аерокосмічної освіти
молоді ім. О.М. Макарова
Олексій КУЛИК

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
аспіранта Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара
Сіренка Максима Костянтиновича

«Розробка та вдосконалення технології пошарового синтезу виробів з
полімерних композиційних матеріалів для авіаційної та ракетно-космічної
техніки»

Комісія НЦАОМ ім. О.М. Макарова у складі: заступниці генерального директора з науки та освіти, к.іст.н. І.В. Федоренко та начальника методичного сектору, к.т.н В.В. Хуторного склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи М.К. Сіренка «Розробка та вдосконалення технології пошарового синтезу виробів з полімерних композиційних матеріалів для авіаційної та ракетно-космічної техніки» представляють науковий інтерес і мають практичну цінність для проведення робіт з створення нових об'єктів ракетно-космічної техніки, а саме вузлів та деталей ракет з полімерних композиційних матеріалів, отриманих методом 3d-друку.

Встановлено, що методика отримання полімерних композиційних матеріалів, отриманих методом 3d-друку, розроблена в дисертаційній роботі, може використовуватись в рамках науково-дослідних робіт, що реалізуються за підтримки НЦАОМ ім. О.М. Макарова з метою якісної практичної підготовки фахівців в галузі ракетобудування.

Комісія підтверджує, що результати досліджень М.К. Сіренка впроваджені в систему стажування та підготовки фахівців ракетно-космічної галузі України. Результати дисертаційної роботи М.К. Сіренка сприяють покращенню експлуатаційних характеристик ракетно-космічної техніки та використовуються у науково-практичній діяльності НЦАОМ ім. О.М. Макарова.

Заступниця генерального директора
з науки і освіти, к.іст.н.



Ірина ФЕДОРЕНКО

Начальник методичного сектору,
Почесний працівник космічної
галузі України, к.т.н.



Віктор ХУТОРНИЙ