

**ІНСТИТУТ ЗАГАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Романенко Владислав Володимирович

УДК 620.681.6

ДИСЕРТАЦІЯ

**ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ КОНТРОЛЮ
ЯКОСТІ ВИРОБІВ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА**

175 – Інформаційно-вимірювальні технології

17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

 В.В. Романенко

Науковий керівник: Ковтун Світлана Іванівна, докт. техн. наук, ст. досл.

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Романенко В.В. Інформаційно-вимірювальна технологія контролю якості виробів адитивного виробництва. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 175 – Інформаційно-вимірювальні технології, галузь знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації. – Інститут загальної енергетики Національна академія наук України, Київ, 2025.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу підвищення якості та надійності процесів 3D-друку складних об'єктів шляхом розроблення й впровадження інформаційно-вимірювальної технології, яка базується на методах комп'ютерного зору, чисельного аналізу та штучного інтелекту. Проведено систематичний аналіз сучасних технологій 3D-друку та визначено їх особливості з урахуванням складності виготовлення виробів, типів матеріалів і технологічних обмежень. Показано, що вибір технології 3D-друку значною мірою впливає на якість і безперервність процесу виготовлення об'єктів, зокрема у випадках високої точності та складної внутрішньої структури. Розглянуто основні джерела помилок у процесі адитивного виробництва та систематизовано методи їх виявлення і мінімізації. Досліджено потенціал використання комп'ютерного зору для онлайн-моніторингу процесу друку з метою оперативного виявлення дефектів і забезпечення неперервності виготовлення. Розроблено математичну модель вирівнювання яскравості пікселів на зображеннях, яка є складником інформаційно-вимірювальної технології, та дозволяє усунути негативний вплив змінного освітлення під час аналізу кадрів процесу 3D-друку. Модель протестована на різноманітних зображеннях, що дозволило суттєво підвищити якість подальшого аналізу та обробки зображень.

У **першому розділі** дисертаційної роботи здійснено комплексний аналіз сучасних технологій адитивного виробництва, зосереджений на забезпеченні якості процесів 3D-друку об'єктів складної геометрії. Наведено класифікацію та

порівняльну характеристику найбільш поширених технологій – пошарового наплавлення, стереолітографії, селективного лазерного спікання та прямого лазерного спікання металу, що дозволяє здійснювати обґрунтований вибір відповідної технології друку залежно від складності об'єкта друку та функціональних вимог до виробу. Також даний розділ містить огляд деяких розробок і методів, що використовуються в 3D-друці, а також виявлено основні обмеження та джерела похибок у процесі адитивного виробництва. Підкреслено важливість адаптації матеріалів до специфіки технології для досягнення високої точності, механічної міцності та стабільності структури друківаних об'єктів. Особливу увагу приділено проблематиці зниження помилок, які виникають унаслідок некоректного вибору технологічних параметрів, деформацій під час друку та порушень термодинамічних режимів. У розділі проведено аналіз методів і засобів інтелектуальних систем комп'ютерного зору на базі згорткових, рекурентних та генеративних нейронних мереж як ефективного засобу моніторингу та управління якістю на всіх етапах адитивного виробництва. Результати аналізу дали змогу сформулювати концептуальні підходи до створення автоматизованих і адаптивних систем контролю та підтримки якості у 3D-друці складних об'єктів, що є теоретичною та практичною основою для подальших досліджень у наступних розділах роботи.

У **другому розділі** дисертаційної роботи розроблено та проаналізовано математичні моделі й апаратно-програмні засоби, які реалізують запропонований метод контролю якості 3D-друку шляхом аналізу зображень у режимі реального часу. У розділі наведено метод вирішення проблеми змінної освітленості, що негативно впливає на точність виявлення дефектів та забезпечення якості друку, зокрема – у виробках зі складною геометрією та дрібними деталями. Сформульовано задачу вирівнювання інтенсивності пікселів з метою покращення якості зображень, що дозволяє усунути вплив нерівномірного освітлення під час візуального моніторингу процесу друку. Розроблено та апробовано чисельний метод вирівнювання освітленості на основі аналізу градієнтних характеристик зображень, що дозволяє зберегти важливі контрастні особливості та деталі

геометрії. Описано структуру створеного програмного забезпечення, що забезпечує інтеграцію методу в реальний процес адитивного виробництва. Розроблена система дає змогу здійснювати автоматизований контроль якості 3D-друку, підвищуючи загальну надійність та продуктивність адитивного виробництва. Математична модель дає можливість покращити зображення з елементами друку, що сприяє підвищенню точності розпізнавання основних видів дефектів 3D-друку.

У **третьому розділі** роботи реалізовано запропоновану інформаційно-вимірювальну технологію контролю якості виробів адитивного виробництва та здійснено її експериментальну валідацію. Для цього обґрунтовано вибір полімерних матеріалів, з урахуванням їх фізико-механічних та електромагнітних властивостей, зокрема — у контексті перспектив їх застосування в конструкціях БПЛА та інших виробках зі спеціальними вимогами. Розроблено програмні засоби моделювання та підготовки дослідних зразків із використанням сучасних CAD/CAM-інструментів. Побудовано моделі, що враховують параметри змішування полімерів та вплив властивостей матеріалів на процес і результат 3D-друку. Описано повний цикл виготовлення дослідних зразків та впровадження системи контролю на етапах проєктування, друку й аналізу результатів. Запропоновано інформаційно-вимірювальну технологію на основі згорткової нейронної мережі для розпізнавання дефектів друку в режимі реального часу. Проведено навчання моделі з використанням сформованої бази даних зображень дефектів, що дозволило досягти високої точності класифікації типових порушень (розшарування, пропуски, зсуви шарів тощо). Забезпечено ефективну інтеграцію програмної й апаратної частин системи, з подальшою валідацією на експериментальних даних. Наведено результати випробувань та досліджень механічних властивостей надрукованих зразків, а також показано ефективність розробленої технології для виявлення дефектів на ранніх етапах друку. Отримані результати підтверджують ефективність розробленого підходу до автоматизованого контролю якості в адитивному виробництві, що забезпечує високу надійність та функціональність готових виробів.

У четвертому розділі роботи здійснено узагальнення результатів реалізації інформаційно-вимірювальної технології, оцінено її ефективність та наведено приклади практичного впровадження. Показано, що вперше було створено математичну модель вирівнювання інтенсивності пікселів у зображеннях виробів адитивного виробництва, яка дозволяє покращити якісний контроль у режимі реального часу, який реалізований з використання нейромережевого підходу. Удосконалена інформаційно-вимірювальна технологія за рахунок застосування підвищує точність розпізнавання класичних дефектів, характерних для серійного 3D-друку на 3–5% порівняно з іншими аналогами. Дослідження продемонструвало підвищення ефективності виробничих процесів за рахунок застосування гнучких та адаптивних систем контролю, заснованих на штучному інтелекті та комп'ютерному зорі.

Наукова новизна отриманих результатів:

уперше:

– розроблено математичну модель, яка описує процес вирівнювання інтенсивності пікселів у зображеннях виробів адитивного виробництва, що дало змогу здійснювати контроль якості виробів в процесі їх 3D-друку за їх зображеннями;

– удосконалено інформаційно-вимірювальну технологію контролю якості виробів адитивного виробництва шляхом застосування методів нормалізації й стандартизації зображень, запровадження розробленої математичної моделі препроцесінгу зображень з об'єктами друку та моделі процесу вирівнювання інтенсивності пікселів, що дає можливість підвищити точність розпізнавання класичних дефектів, які виникають у процесах серійного адитивного виробництва;

отримали подальший розвиток:

– метод препроцесінгу графічних об'єктів, який базується на нормалізації й стандартизації зображень перед їхнім статистичним аналізом.

Практичне значення. Використання розробленої ІВТ 3D-друку із полімерних композитів з покращеними характеристиками, зокрема,

радіопрозорістю, дало змогу виготовити дослідні зразки конструктивних елементів радіотехнічного обладнання БпЛА, які були успішно застосовані у підрозділі безпілотних систем. Було визначено, що погіршення радіопрозорості може привести до втрат енергії сигналів надвисоких частот (НВЧ) в каналах передачі даних за рахунок її поглинання конструктивними елементами, до зміни резонансних частот внаслідок поглинання матеріалом вологи тощо. Тому застосування таких матеріалів дозволяє уникнути некоректної роботи радіотехнічного обладнання БпЛА в діапазоні НВЧ, викликані цим фактором.

Також результати наукової роботи було впроваджено у Київському міжнародному університеті в освітньому процесі освітньо-професійної програми підготовки бакалаврів за спеціальністю 122 – «Комп'ютерні науки» в зміст освітніх компонентів «Комп'ютерна графіка» та «Методи та системи штучного інтелекту». Зокрема у процес фахової підготовки зазначених вище освітніх компонентів було впроваджено:

- швидкісні методи й алгоритми опрацювання зображень і відеопотоків даних із метою прискорення їхнього аналізу;
- метод препроцесінгу графічних об'єктів, які базуються на нормалізації та стандартизації зображень для їхнього морфологічного аналізу;
- методи і засоби машинного навчання для задач з метою розпізнавання образів на прикладі задачі розпізнавання дефектів за даними, що отримуються в процесі адитивного виробництва.

Упроваджені нові дані, які здобуті у процесі наукової роботи, підвищили якість підготовки студентів за спеціальністю 122 – «Комп'ютерні науки», оскільки дали змогу розробляти швидкі методи й алгоритми розв'язання складних інженерних задач за умови обмежених обчислювальних ресурсів.

У рамках впровадження результатів дисертаційного дослідження на підприємстві ТОВ «Промел Енергоавтоматика» було здійснено:

- проєктування і реалізацію моделей елементів енергетичного обладнання у САD-середовищах, що дозволяє гнучко змінювати параметри конструкцій та адаптувати їх до конкретних умов експлуатації;

– упровадження технології змішування двох полімерів в екструдері. Цей підхід дозволяє отримувати композитні матеріали з покращеними характеристиками, необхідними для енергетичних застосувань.

Завдяки цим інноваціям підприємство отримало змогу більш точно та обґрунтовано ухвалювати проєктні рішення, що стосуються виготовлення складових частин енергетичного обладнання з урахуванням вимог до матеріалів і конструктивних характеристик.

На підприємстві ТОВ НВП «Ультракон» реалізовано результати дослідження шляхом:

– проєктування та створення САD-моделей елементів обладнання ультразвукових систем контролю. Це дозволяє підвищити точність, надійність та швидкість створення нових виробів;

– використання технології змішування двох полімерів в екструдері, що забезпечує формування матеріалів із необхідними фізико-механічними характеристиками для систем неруйнівного контролю.

Підприємство змогло впровадити інноваційний підхід до виготовлення елементів ультразвукових систем, що контролюють якість матеріалів у різних галузях промисловості.

Ключові слова: адитивне виробництво, 3D-друк, інформаційно-вимірювальна технологія, змішування полімерів, рівняння Пуассона, штучні нейронні мережі, вирівнювання нерівномірної інтенсивності (яскравості) пікселів.

Список публікацій здобувача,

у яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. *Романенко В.В., Голубєв Л.П.* (2020) Дослідження програмного забезпечення для виявлення та виправлення дефектів 3D-друку. Вісник Херсонського національного технічний університет, 3 (74), 2020 р. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2020.3.8> (фахове видання, категорія Б, ISSN 2078-4481).

2. **Romanenko V., Nazarenko O.** (2024) Comparative Analysis of Modern Technologies of Additive Production. *System Research in Energy*, 2(77), 84–96. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.02.084> (фахове видання, категорія Б, ISSN 2786-7102).
3. **Romanenko V., Bekesheva A, Khaidurov V., Yarovoy R.** (2024) Using the variational principle of leveling illumination in images. *ITTAP 2024: 4th International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems*, October 23-25, 2024, Ternopil, Ukraine, Opole, Poland. CEUR-WS.org. (Scopus, ISSN 1613-0073). Pp. 355–366. Режим доступу: <https://ceur-ws.org/Vol-3896/paper20.pdf>.
4. **Romanenko V., Kovtun S.** (2024) Technology of Quality Control of Additive Manufacturing Products During Printing of Elements of Energy Complexes. *System Research in Energy*, 4(80), 84–96. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.110>. (фахове видання, категорія Б, ISSN 2786-7102).

Список публікацій здобувача,

які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. **Романенко В., Хайдуров В.** (2024) Аналіз сучасних технологій адитивного виробництва. *The 3rd International scientific and practical conference “European congress of scientific achievements”* (March 25-27, 2024) Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain. 2024. 240 p. ISBN 978-84-15927-35-8. С. 82–88.
6. **Романенко В.** (2024) Порівняльний аналіз забезпечення контролю процесів адитивного виробництва. *The 9th International scientific and practical conference “Current challenges of science and education”* (May 6-8, 2024) MDPC Publishing, Berlin, Germany. 2024. 485 p. ISBN 978-3-954753-05-5. С. 254–259.
7. **Romanenko V.** (2024) State-of-the-art Detection of Defects in the Process of Manufacturing Objects of Serial Additive Manufacturing Based on Artificial Intelligence. *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2024). Сімнадцята міжнародна науково-практична конференція*, 21–22 травня 2024 р., Київ, Україна. – К.: НАУ, 2024. – 516 с.

8. **Романенко В.** (2024) Технологія контролю якості виробів адитивного виробництва в ході друку елементів енергетичних комплексів. *II Міжнародна науково-практична конференція «Цифрові технології в енергетиці і автоматичності»*, 7 червня 2024 року, м. Київ. ISSN 2786-7102 (Online), ISSN 2786-7633 (Print). С. 43–45.
9. **Романенко В., Заячковський В., Подніжний С.** (2025) Технології і моделі змішування полімерів в екструдері принтерів. *XXX Міжнародна науково-практична конференція «Перспективи розвитку сучасної науки багатoproфільного університету в контексті інтеграції в міжнародний освітній простір»*, 27–28 березня 2025 року, м. Київ. С. 331–336.

ABSTRACT

Romanenko V.V. Information and measurement technology for quality control of additive manufacturing products. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the Doctor of Philosophy degree in specialty 175 – Information and measurement technologies, field of knowledge 17 – Electronics, automation and electronic communications. – Institute of General Energy, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2025.

The dissertation solves the urgent scientific and technical problem of improving the quality and reliability of 3D printing processes of complex objects by developing and implementing information and measurement technology based on computer vision, numerical analysis, and artificial intelligence methods. A systematic analysis of modern 3D printing technologies has been conducted and their features have been identified, taking into account the complexity of manufacturing products, types of materials, and technological limitations. It has been shown that the choice of 3D printing technology significantly affects the quality and continuity of the object manufacturing process, particularly in cases of high accuracy and complex internal structure. The main sources of errors in the additive manufacturing process have been considered and methods for their detection and minimization have been systematized. The potential of using computer vision for online monitoring of the printing process has been investigated in order to promptly detect defects and ensure continuity of production. A mathematical model of pixel brightness equalization in images has been developed, which is a component of information and measurement technology and allows eliminating the negative impact of variable lighting during the analysis of frames of the 3D printing process. The model has been tested on various images, which has significantly improved the quality of further analysis and processing of images.

The first section of the dissertation provides a comprehensive analysis of modern additive manufacturing technologies, focused on ensuring the quality of 3D printing processes for objects with complex geometry. The most common technologies are classified and compared – layer-by-layer deposition, stereolithography, selective laser sintering and direct laser sintering of metal – allowing for an informed choice of the

appropriate printing technology depending on the complexity of the project and functional requirements for the product. This section also provides an overview of some developments and methods used in 3D printing, and identifies the main limitations and sources of errors in the additive manufacturing process. The importance of adapting materials to the specifics of the technology is emphasized in order to achieve high accuracy, mechanical strength and stability of the structure of printed objects. Particular attention is paid to the issue of reducing errors that arise due to incorrect selection of technological parameters, deformations during printing and violations of thermodynamic regimes. The section analyzes the methods and tools of intelligent computer vision systems based on convolutional, recurrent and generative neural networks as an effective means of monitoring and managing quality at all stages of additive manufacturing. The results of the analysis allow us to form conceptual approaches to the creation of automated and adaptive quality control and support systems in 3D printing of complex objects, which is the theoretical and practical basis for further research in the following sections of the work.

In the second section of the dissertation, mathematical models and hardware and software tools that implement the proposed method of 3D printing quality control by analyzing images in real time are developed and analyzed. The section presents a method for solving the problem of variable illumination, which negatively affects the accuracy of defect detection and printing continuity, in particular, in products with complex geometry and small details. The problem of pixel intensity equalization is formulated in order to improve image quality, which allows eliminating the influence of uneven lighting during visual monitoring of the printing process. A numerical method for equalizing illumination based on the analysis of gradient characteristics of images is developed and tested, which allows preserving important contrast features and geometric details. The structure of the created software is described, which ensures the integration of the method into the real process of additive manufacturing. The developed system allows for automated control of 3D printing continuity, increasing the overall reliability and productivity of additive manufacturing. The mathematical model makes

it possible to improve images with printing elements, which helps to increase the accuracy of recognizing the main types of 3D printing defects.

In the third section of the work, the proposed information and measurement technology for quality control of additive manufacturing products is implemented and its experimental validation is carried out. For this purpose, the choice of polymer materials is justified, taking into account their physical, mechanical and electromagnetic properties, in particular in the context of the prospects for their application in UAV designs and other products with special requirements. Software tools for modeling and preparing prototypes using modern CAD/CAM tools are developed. Models are built that take into account polymer mixing parameters and the influence of material properties on the process and result of 3D printing. The full cycle of manufacturing prototypes and the implementation of a control system at the stages of design, printing and analysis of results is described. An information and measurement technology based on a convolutional neural network for recognizing printing defects in real time is proposed. The model was trained using the formed database of defect images, which made it possible to achieve high accuracy in the classification of typical violations (delamination, gaps, layer displacements, etc.). Effective integration of the software and hardware parts of the system was ensured, with subsequent validation on experimental data. The results of tests and studies of the mechanical properties of printed samples were presented, and the effectiveness of the developed technology for detecting defects at the early stages of printing was also shown. The results obtained confirm the effectiveness of the developed approach to automated quality control in additive manufacturing, which ensures high reliability and functionality of finished products.

In the fourth section of the work, the results of the implementation of information and measurement technology are summarized, its effectiveness is assessed, and examples of practical implementation are given. It is shown that for the first time a mathematical model of pixel intensity alignment in images of additive manufacturing products was created, which allows improving quality control in real time, which is implemented using a neural network approach. Advanced information and measurement technology through the use of increases the accuracy of recognition of classic defects

characteristic of serial 3D printing by 3–5% compared to other analogues. The study demonstrated an increase in the efficiency of production processes through the use of flexible and adaptive control systems based on artificial intelligence and computer vision.

Scientific novelty of the obtained results:

for the first time:

- a mathematical model was developed that describes the process of equalizing pixel intensity in images of additively manufactured products, which made it possible to control the quality of products during their 3D printing based on their images;

- the information and measurement technology for quality control of additive manufacturing products has been improved by applying image normalization and standardization methods, introducing a developed mathematical model of preprocessing images with printing objects and a model of the pixel intensity equalization process, which makes it possible to increase the accuracy of recognition of classic defects that arise in serial additive manufacturing processes;

were further developed:

- a method of preprocessing graphic objects, which is based on normalization and standardization of images before their statistical analysis.

Practical meaning. The results of the dissertation research, which was carried out at the Institute of General Power Engineering of the NAS of Ukraine, namely, prototypes of structural elements of UAV radio equipment, manufactured using advanced 3D printing technology from polymer composites with improved characteristics, in particular, radio transparency, were successfully applied in the unmanned systems division. It was determined that the deterioration of radio transparency can lead to losses of ultrahigh frequency signal energy in data transmission channels due to its absorption by structural elements, to changes in resonant frequencies due to moisture absorption by the material, etc. Therefore, the use of such materials allows to avoid incorrect operation of UAV radio equipment in the microwave range caused by this factor.

Also, the results of scientific work were introduced into the educational process of the educational and professional program for training bachelors in specialty "Computer Science" in the content of the educational components "Computer Graphics" and "Methods and Systems of Artificial Intelligence". In the process of professional training of the above educational components, the following were introduced, in particular:

- high-speed methods and algorithms for processing images and video data streams in order to accelerate their analysis;
- a method for preprocessing graphic objects based on normalization and standardization of images for their morphological analysis;
- methods and tools of machine learning for tasks for the purpose of pattern recognition on the example of the task of recognizing defects based on data obtained in the process of additive manufacturing.

The implemented results obtained in the process of scientific work improved the quality of training of students in specialty "Computer Science", as they made it possible to develop fast methods and algorithms for solving complex engineering problems under conditions of limited computing resources.

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, information and measurement technology, polymer mixing, Poisson's equation, artificial neural networks, smoothing uneven pixel intensity (brightness).

List of publications of the acquirer,

in which the main scientific results of the dissertation are published

1. *Romanenko V.V. Golubev L.P.* (2020) Research on software for detecting and correcting 3D printing defects. *Bulletin of the Kherson National Technical University*, 3 (74), 2020 (category B, ISSN 2078-4481).

2. *Romanenko V., Nazarenko O.* (2024) Comparative Analysis of Modern Technologies of Additive Production. *System Research in Energy*, 2(77), 84–96. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.02.084>. (category B, ISSN 2786-7102).

3. *Bekesheva A, Khaidurov V., Romanenko V., Yarovoy R.* (2024) Using the variational principle of leveling illumination in images. *ITTAP 2024: 4th International*

Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, October 23–25, 2024, Ternopil, Ukraine, Opole, Poland. CEUR-WS.org. (Scopus, ISSN 1613-0073). Pp. 355–366. Access mode: <https://ceur-ws.org/Vol-3896/paper20.pdf>.

4. **Romanenko V., Kovtun S.** (2024) Technology of Quality Control of Additive Manufacturing Products During Printing of Elements of Energy Complexes. *System Research in Energy*, 4(80), 84–96. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.110>. (category B, ISSN 2786-7102).

which certify the approval of the dissertation materials

5. **Romanenko V., Khaidurov V.** (2024) Analysis of modern technologies of additive manufacturing. *The 3rd International scientific and practical conference “European congress of scientific achievements” (March 25-27, 2024) Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain.* 2024. 240 p. ISBN 978-84-15927-35-8. P. 82–88.

6. **Romanenko V.** (2024) Comparative analysis of control of additive manufacturing processes. The 9th International scientific and practical conference “Current challenges of science and education” (May 6-8, 2024) MDPC Publishing, Berlin, Germany. 2024. 485 p. ISBN 978-3-954753-05-5. P. 254–259.

7. **Romanenko V.** (2024) State-of-the-art Detection of Defects in the Process of Manufacturing Objects of Serial Additive Manufacturing Based on Artificial Intelligence. Integrated Intelligent Robotic Complexes (IIRTK-2024). Seventeenth International Scientific and Practical Conference May 21–22, 2024, Kyiv, Ukraine. – Kyiv: NAU, 2024. – 516 p.

8. **Romanenko V.** (2024) Quality control technology for additive manufacturing products during printing of energy complex elements. II International Scientific and Practical Conference “Digital Technologies in Power Engineering and Automation” June 7, 2024, Kyiv. ISSN 2786-7102 (Online), ISSN 2786-7633 (Print). pp. 43–45.

9. **Romanenko V., Zayachkovskiy V., Podnizhnyi S.** (2025) XXX International Scientific and Practical Conference "Prospects for the Development of Modern Science of a Multidisciplinary University in the Context of Integration into the International Educational Space", March, 27–28 2025, m. Kyiv. Pp. 331–336.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	19
ВСТУП	22
РОЗДІЛ 1 ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДТРИМКИ ЯКОСТІ І НЕПЕРЕРВНОСТІ 3D-ДРУКУ СКЛАДНИХ ОБ’ЄКТІВ	30
1.1 Вибір технологій друку залежно від обраних цілей і складності геометричних форм об’єктів 3D-друку	30
1.2 Актуальні технології у 3D-друці об’єктів складної форми	34
1.2.1 Технологія пошарового наплавлення.....	34
1.2.2 Технологія стереолітографії в адитивному виробництві	35
1.2.3 Технологія селективного лазерного спікання	36
1.2.4 Технологія прямого лазерного спікання металу	38
1.2.5 Інші технології і засоби адитивного виробництва.....	39
1.3 Порівняльний аналіз технологій, матеріалів і методів адитивного виробництва	40
1.4 Зменшення помилок в процесі адитивного виробництва	48
1.5 Використання нейромережевих технологій в керуванні якістю технологічних процесів адитивного виробництва	49
1.5.1 Згорткові нейронні мережі	49
1.5.2 Рекурентні нейронні мережі.....	50
1.5.3 Генеративні нейронні мережі.....	51
Висновки до першого розділу	56
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛІ Й АПАРАТНО-ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ 3D-ДРУКУ ..	58
2.1 Проблема освітленості в ході аналізу кадрів для забезпечення якості друку елементів зразків	58
2.2 Постановка завдання вирівнювання інтенсивності пікселів з метою поліпшення зображень з об’єктом 3D-друку	62
2.3 Проведення обчислювальних експериментів	67

2.3.1	Чисельний метод розв’язання задачі вирівнювання яскравості досліджуваних зображень з об’єктами друку	67
2.3.2	Перевірка чисельного методу на різних зображеннях	74
2.4	Загальна структура розробленого програмного забезпечення	78
	Висновки до другого розділу	81
РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ДОСЛІДНИХ ЗРАЗКІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ВИРОБІВ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА		
3.1	Вибір матеріалів для реалізації дослідних зразків	82
3.2	Програмне проектування дослідних зразків	85
3.3	Математичні моделі врахування фізичних властивостей полімерів для змішування	89
3.4	Хід 3D-друку спроектованих дослідних зразків	92
3.5	Обладнання для випробування дослідних зразків	95
3.6	Результати експериментальних досліджень	96
3.7	Експериментальні дослідження радіопрозорості матеріалів для 3D-друку елементів БПЛА	105
3.8	Реалізація методу і засобу змішування полімерів в екструдері	108
	Висновки до третього розділу	111
РОЗДІЛ 4 ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ 3D-ДРУКУ		
4.1	Складники розробленої інформаційно-вимірювальної технології	112
4.2	Формування даних для навчання моделі розпізнавання основних типів дефектів 3D-друку в реальному часі	113
4.3	Архітектура штучної згорткової нейронної мережі для розпізнавання дефектів друку в реальному часі	114
4.4	Взаємодія програмної й апаратної частини інформаційно-вимірювальної технології	117
4.5	Валідація інформаційно-вимірювальної технології	119

Висновки до четвертого розділу	121
ВИСНОВКИ.....	122
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	124
ДОДАТКИ	136
ДОДАТОК А <i>СВІДОЦТВО ПРО РЕЄСТРАЦІЮ АВТОРСЬКОГО ПРАВА НА ТВІР</i>	<i>137</i>
ДОДАТОК Б <i>ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДУЛЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИРІВНЮВАННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ПІКСЕЛІВ У НЕРІВНОМІРНО ОСВІТЛЕНИХ ЗОБРАЖЕННЯХ, ЩО ОТРИМУТЬСЯ У ПРОЦЕСІ 3D-ДРУКУ</i>	<i>138</i>
ДОДАТОК В <i>ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДУЛЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АНАЛІЗУ Й ВІЗУАЛІЗАЦІЇ РОЗРИВУ ВИГОТОВЛЕНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ЗРАЗКІВ ЗАСОБАМИ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА.....</i>	<i>141</i>
ДОДАТОК Г <i>ПРАКТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТЕСТУВАНЬ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ЗРАЗКІВ НА РОЗРИВНІЙ МАШИНІ.....</i>	<i>142</i>
ДОДАТОК Д <i>ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ЩО БУЛО ВИКОРИСТАНЕ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НЕПЕРЕВНОГО ПРОЦЕСУ ДРУКУ.....</i>	<i>152</i>
ДОДАТОК Е <i>ВІДОМОСТІ ПРО ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРІАЛІВ</i>	<i>154</i>
ДОДАТОК Ж <i>АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.....</i>	<i>156</i>
ДОДАТОК К <i>ПЕРЕЛІК НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ, У ЯКИХ ВІДОБРАЖЕНО ТЕОРЕТИЧНІ І ПРАКТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....</i>	<i>161</i>

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

FDM	– Fused Deposition Modeling
FFF	– Fused Filament Fabrication
SLA	– стереолітографія
CAD	– система автоматизованого проектування
ABS	– Acrylonitrile Butadiene Styrene – міцний, термостійкий, популярний інженерний пластик
ABS+	– модифікований ABS з покращеними механічними властивостями (ударна міцність, зменшене викривлення)
ABS Flex	– гнучкий варіант ABS, з доданими еластомерами
ABS Pro	– високоякісний ABS з покращеною термостійкістю та точністю друку
MBS	– Methyl Methacrylate-Butadiene-Styrene – альтернатива ABS, має вищу прозорість та стійкість до ударів
PETG	– Polyethylene Terephthalate Glycol – міцний, прозорий, стійкий до вологи та хімії
PCTG	– Poly-Cyclohexylenedimethylene Terephthalate Glycol – ударостійкий аналог PETG з кращою прозорістю
PLA	– Polylactic Acid – біорозкладний, простий у друці, не термостійкий
PLA+	– PLA з додаванням пластифікаторів/волокон для покращення міцності та гнучкості
T-PLA	– Tough PLA – удароміцний PLA, альтернатива ABS.
PLA-HT	– High Temperature PLA – модифікований PLA, термостійкий після відпалу
PLA-LW	– Light Weight PLA – спеціальний легкий PLA, який спінюється при друку (для дронів, авіамоделей)
HIPS	– High Impact Polystyrene – підтримуючий матеріал, розчинний у лимонені, або легкий пластик із низькою вагою

SAN	– Styrene Acrylonitrile – жорсткий, прозорий пластик з хорошою хімічною стійкістю
SILK	– PLA або PETG з глянцеvim ефектом шовку, для естетичного друку
Elastan	– Elastan D70 / D100 / D160 різновиди еластичних ниток на основі TPE або TPU, де цифри означають жорсткість (D – шкала Shore D)
TPU 40D	– Thermoplastic Polyurethane, Shore D 40 – дуже гнучкий матеріал
TPU 80A	– TPU з жорсткістю 80 по Shore A – м'який та еластичний
PET	– Polyethylene Terephthalate – основа для PETG, часто більш твердий
PC	– Polycarbonate – надзвичайно міцний, прозорий, термостійкий пластик
Nylon	– Nylon (PA6) Polyamide 6 – високоміцний, зносостійкий, вбирає вологу
PA	– Polyamide – загальна назва для нейлону
PA+	– модифікований нейлон (підвищена міцність, термостійкість, стабільність)
ASA	– Acrylonitrile Styrene Acrylate – аналог ABS, але з підвищеною стійкістю до ультрафіолету
PBT	– Polybutylene Terephthalate – термостійкий, хімічно стійкий технічний термопластик
ABS/PC	– сплав ABS та полікарбонату – поєднує гнучкість та міцність
PP	– Polypropylene – легкий, хімічно стійкий, важкий у друці через погане зчеплення
WAX	– віск для лиття по виплавлюваних моделях (зникає при нагріві)
CGF	– NYLON-CGF (GLASS FIBER) нейлон, армований скловолокном – підвищена жорсткість і термостійкість
CCF	– NYLON-CCF (CARBON FIBER) нейлон з вуглеволокном – міцний, легкий, жорсткий
ABS+FR15	– (Flame-Retardant) ABS з антипіренами (15% добавка), вогнетривкий

- PLA-CCu – PLA, наповнений міддю – має електропровідність або декоративний вигляд
- PLA-CFe – PLA, наповнений залізом – магнітиться, важчий
- PRO CCF – ABS PRO CCF (CARBON FIBER) професійний ABS з вуглеволокном – дуже жорсткий, високотемпературний
- PRO CGF – ABS PRO CGF (GLASS FIBER) ABS з скловолокном – міцність без крихкості
- D70 CCF – ELASTAN D70 CCF (CARBON FIBER) гнучкий матеріал із вуглеволокном – унікальне поєднання гнучкості та жорсткості
- 3D – 3-вимірний / має три розмірності
- AB – адитивне виробництво
- БпЛА – безпілотні літальні апарати
- НВЧ – надвисока частота
- ШІ – штучний інтелект

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. У сучасних умовах інтенсивного розвитку цифрових виробничих технологій особливу увагу науковців і виробничників привертає адитивне виробництво, яке використовує технології 3D-друку і відкриває нові можливості для виготовлення складних об'єктів із високим ступенем індивідуалізації, оптимізацією масогабаритних характеристик та зниженням відходів. Проте зі зростанням вимог до якості готової продукції виникає проблема забезпечення стабільності, точності та неперервності процесів 3D-друку, особливо у випадках виготовлення виробів складної геометричної форми або з функціонально важливих матеріалів.

Одним із ключових викликів є потреба у системах контролю якості в режимі реального часу, здатних автоматично виявляти дефекти, порушення технологічного режиму та негайно реагувати на них. Існуючі підходи переважно базуються на постфактум-аналізі або потребують втручання оператора, що обмежує їх застосування в умовах серійного та безперервного виробництва. Застосування методів комп'ютерного зору, штучного інтелекту, зокрема згорткових нейронних мереж, відкриває перспективи для побудови адаптивних систем моніторингу, здатних підвищити надійність і якість виготовлення продукції без переривання технологічного процесу.

Особливої актуальності набуває розробка апаратно-програмних засобів, які дозволяють інтегрувати методи й алгоритми обробки відеоданих, аналізу зображень та прийняття рішень у реальному часі без істотного збільшення вартості системи. Це створює передумови для широкого впровадження таких рішень у малих та середніх підприємствах, науково-дослідних лабораторіях, а також у високотехнологічних галузях – від авіаційної промисловості до медицини.

Обрана тема дисертаційної роботи є актуальною, оскільки спрямована на вирішення важливої науково-прикладної задачі – підвищення якості 3D-друку складних об'єктів шляхом створення системи контролю, яка поєднує сучасні

методи комп'ютерного зору з гнучкими інструментами аналізу виробничих процесів. Отримані результати мають як теоретичну і практичну цінність для розвитку технологій 3D-друку в умовах трансформації промисловості.

У розробці композитних полімерів, моделей полімеризації, практичного застосування отриманих полімерів в різних галузях науки й техніки, застосуванні штучного інтелекту у серійному адитивному виробництві присвячено роботи таких вчених, як Савченко Б.М., Слепцов О.О., Сова Н.В., Klippstein H., Hassanin H., Mukherjee T., Kao N., Zhang Y., Zhang Y., She W., Yang L., Liu G. та інших. Розробленням математичних та комп'ютерних моделей автоматизації процесів адитивного виробництва було присвячено низку робіт Davtalab O., Kazemian A., Yuan X., Bisheh M.N., Chang S.I., Lei S., Nasiri S., Khosravani M.R., Oleff A., Küster B., Stonis M., Overmeyer L., Ashrafi N., Duarte J.P., Nazarian S., Meisel N.A. та ін.

Роботи відомих авторів мають різні аспекти, які включають методи, моделі й засоби забезпечення якості друку, але комплексно не повною мірою підходять до вирішення проблеми, яка полягає у розробленні інформаційно-вимірювальної технології контролю якості продуктів адитивного виробництва з використанням сучасних методів й алгоритмів штучного інтелекту, а також методів формування зразків з дефектами друку високої якості, що є необхідними вхідними даними для навчання моделей нейромережевими методами. Формування бази даних з якісними зразками, що містять типові дефекти з відомими параметрами, дає можливість розробити прикладне програмне забезпечення, яке є ключовим структурним елементом інформаційно-вимірювальної технології.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика та розділи цієї дисертації роботи входили до складу наукових робіт, які були виконані в Інституті загальної енергетики Національної академії наук (НАН) України. Отримані результати досліджень здобувача увійшли до складу наукових робіт:

– науково-дослідна робота ІЗЕ-2024/1 «Застосування технологій 3D-друку для створення елементів озброєння та комплектуючих бойових БпЛА» (КПКВК

6541230, № 0124U000005д) відповідно до тематичного плану науково-досліджень Інституту загальної енергетики НАН України, затвердженого 10 лютого 2024 року;

– науково-дослідна робота (№ 0225U000422) «Розроблення інформаційно-вимірювальної системи моніторингу технічного стану сонячних електростанцій» відповідно до тематичного плану науково-досліджень Інституту загальної енергетики НАН України.

Мета та завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є удосконалення інформаційно-вимірювальної технології контролю якості виробів адитивного виробництва шляхом розроблення прикладного програмного забезпечення візуального контролю якості адитивного виробництва із застосуванням методів і засобів комп'ютерного зору і машинного навчання як сукупності теоретичного, алгоритмічного та апаратно-програмного забезпечення.

Для досягнення поставленої мети дослідження було сформульовано та вирішено

наукові завдання:

– розробити математичну модель вирівнювання інтенсивності пікселів у зображеннях, які отримуються в реальному часі в ході 3D-друку;

– розробити модель нейромережевого типу з метою ефективного (швидкого і точного) розпізнавання технологічних дефектів в ході процесу 3D-друку елементів складних об'єктів на ранній стадії їх виникнення;

– удосконалити (прискорити) методи наближених обчислень для пошуку розв'язку рівняння Пуассона, що використовується для поканального аналізу кадру в темпі їх отримання з камери;

– розробити інформаційно-вимірювальну технологію контролю якості виробів адитивного виробництва;

практичні завдання:

– програмно реалізувати теоретично розроблену математичну модель вирівнювання інтенсивності пікселів у кадрах, які отримуються в реальному часі в ході 3D-друку елементів, та виконати її валідацію;

– програмно реалізувати нейромережеву модель розпізнавання дефектів другу елементів у реальному часі, виконати її валідацію.

– реалізувати інформаційно-вимірювальну технологію контролю якості виробів адитивного виробництва.

Об’єкт дослідження – процеси друку об’єктів адитивного виробництва та методи забезпечення якості друку об’єктів складних геометричних форм.

Предмет дослідження – програмно-апаратні засоби і технології забезпечення якості процесів адитивного виробництва.

Методи дослідження. У роботі використані такі наукові методи досліджень:

– методи математичного і комп’ютерного моделювання – для реалізації наближених методів знаходження розв’язків рівнянь математичної фізики еліптичного типу (рівняння Пуассона), які використовуються для опрацювання кадрів з зображеннями об’єктів друку в реальному часі;

– методи системного аналізу – для розроблення і реалізації інформаційно-вимірювальної технології контролю якості виробів адитивного виробництва, яка складається з: методів опрацювання зображень на основі рівняння Пуассона з метою поліпшення якості кадрів зображень, методів коригування зображень на основі принципу стандартизації і нормалізації зображень; нейромережевих моделей, які навчаються і визначають наявність відомих типів дефектів, що виникають у процесі 3D-друку;

– експериментальний метод – для визначення фізико-технічних характеристик полімерів, які отримані шляхом змішування вже відомих матеріалів та порівняння отриманих характеристик з класичними відомими матеріалами, які використовуються в різних напрямках сучасного адитивного виробництва, а також для розроблення макетів об’єктів друку спеціальних геометричних форм та їх реалізації сучасними 3D-принтерами.

– статистичний метод – для аналізу результатів визначення дефектів друку на основі технології машинного навчання і комп’ютерного зору, зокрема, для визначення показника достовірності інформаційно-вимірювальної технології

(валідація), яка полягає у визначення похибки класифікації дефектів в сучасних процесах адитивного виробництва;

– метод нелінійного програмування – для формування і реалізації математичних моделей підбору матеріалів для змішування з метою отримання нових полімерів з покращеними фізико-технічними характеристиками.

Наукова новизна одержаних результатів дисертаційного дослідження

1. Уперше розроблено математичну модель, яка описує процес вирівнювання інтенсивності пікселів у зображеннях виробів адитивного виробництва, що дало змогу здійснювати контроль якості виробів в процесі їх 3Ддруку за їх зображеннями.

2. Удосконалено інформаційно-вимірювальну технологію контролю якості виробів адитивного виробництва шляхом застосування методів нормалізації й стандартизації зображень, запровадження розробленої математичної моделі препроцесінгу зображень з об'єктами друку та моделі процесу вирівнювання інтенсивності пікселів, що дає можливість підвищити точність розпізнавання класичних дефектів, які виникають у процесах серійного адитивного виробництва.

3. Удосконалено методи пошуку наближених розв'язків задач математичної фізики еліптичного типу, які використовуються для препроцесінгу зображень перед процедурою машинного навчання з метою розпізнавання дефектів друку у реальному часі, що забезпечує підвищення надійності оптичного (візуального) контролю процесів адитивного виробництва.

4. Отримав подальший розвиток метод препроцесінгу графічних об'єктів, який базується на нормалізації й стандартизації зображень перед їхнім статистичним аналізом.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена інформаційно-вимірювальна технологія розпізнавання основних класів дефектів, які виникають у сучасних процесах адитивного виробництва, має основні складники: апаратна частина – 3D-принтер зі спеціальною камерою і програмна частина, до складу якої входить два основні модулі – програмна реалізація моделі препроцесінгу кадрів

зображень та програмна реалізація нейромережевої моделі визначення дефектів друку. Комплекс розробленої і реалізованої інформаційно-виміральної технології передбачає автоматизовану зупинку процесу 3D-друку у разі, якщо відбувається збій, який полягає у формуванні типових дефектів таких як відшаровування, ефект «спагеті» тощо.

Результати дисертаційного дослідження, яке виконано в Інституті загальної енергетики НАН України, а саме дослідні зразки конструктивних елементів радіотехнічного обладнання БпЛА, що виготовлені шляхом застосування удосконаленої технології 3D-друку із полімерних композитів з покращеними характеристиками, зокрема, характеристиками радіопрозорості, були успішно застосовані у підрозділі безпілотних систем. Було визначено, що погіршення радіопрозорості може привести до втрат енергії сигналів надвисоких частот (НВЧ) в каналах передачі даних за рахунок її поглинання конструктивними елементами, до зміни резонансних частот внаслідок поглинання матеріалом вологи тощо. Застосування таких матеріалів дає змогу уникнути некоректної роботи радіотехнічного обладнання БпЛА в діапазоні НВЧ, викликаній цим фактором.

Результати наукової роботи було впроваджено в освітній процес освітньо-професійної програми підготовки бакалаврів за спеціальністю 122 – «Комп'ютерні науки» в зміст освітніх компонентів «Комп'ютерна графіка» та «Методи та системи штучного інтелекту». Зокрема у процес фахової підготовки зазначених вище освітніх компонентів було впроваджено:

- швидкісні методи й алгоритми опрацювання зображень і відеопотоків даних із метою прискорення їхнього аналізу;
- метод препроцесінгу графічних об'єктів, які базуються на нормалізації та стандартизації зображень для їхнього морфологічного аналізу;
- методи і засоби машинного навчання для задач з метою розпізнавання образів на прикладі задачі розпізнавання дефектів за даними, що отримуються в процесі адитивного виробництва.

Упроваджені нові дані, які здобуті у процесі наукової роботи, підвищили якість підготовки студентів за спеціальністю 122 – «Комп'ютерні науки», оскільки дали змогу розробляти швидкі методи й алгоритми розв'язання складних інженерних задач за умови обмежених обчислювальних ресурсів.

Особистий внесок здобувача. Наведені у дисертаційній роботі наукові праці [6], [7], [8], [9] підготовлено здобувачем самостійно.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить: [1] – досліджено різні програмні методи і засоби реалізації макетів об'єктів складної геометричної форми, а також методи контролю якості їх друку (для визначення основних типів дефектів, які виникають в процесі друку деталей) з використанням методів, моделей і засобів комп'ютерного зору; [2] – проведений детальний аналіз технологій 3D-дуку типу Fused Deposition Modeling, Stereolithography, Selective Laser Sintering, Direct Metal Laser Sintering, Digital Light Processing. Проведено порівняльний аналіз даних технологій за різними критеріями, такими як: точність, швидкість, міцність, застосування, вартість, складність деталей, постобробка тощо; [3] – побудована і обґрунтована математична модель вирівнювання інтенсивності пікселів в кадрах, які отримуються у режимі реального часу. Математична модель лежить в основі інформаційно-вимірювальної технології контролю якості виробів адитивного виробництва, суть якої полягає у попередньому опрацюванні кадрів зображень, які подаються на вхід до розробленої нейромережевої моделі розпізнавання основних дефектів адитивного виробництва; [4] – проведений аналіз і обрано сучасні технології для реалізації нейромережевої моделі контролю якості продукції адитивного виробництва в процесі друку елементів різних комплексів; [5] – виконано аналіз технологій сучасного адитивного виробництва, який дає можливість здійснювати вибір технології з урахуванням особливостей проєкту, який буде розроблений з використанням сучасних технологій друку. Проведений аналіз формує уявлення про особливості кожної технології та сфери застосування.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи були представлені на всеукраїнських та міжнародних наукових та науково-практичних конференціях:

– 3rd International scientific and practical conference “European congress of scientific achievements”, March 25–27, 2024, Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain. 2024;

– 9th International scientific and practical conference “Current challenges of science and education”, May 6–8, 2024, MDPC Publishing, Berlin, Germany. 2024. 485 p. ISBN 978-3-954753-05-5.

– Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2024). Сімнадцята міжнародна науково-практична конференція, 21–22 травня 2024 р., Київ, Україна;

– II Міжнародна науково-практична конференція «Цифрові технології в енергетиці і автоматизації», 7 червня 2024 року, Київ, Україна;

– XXX Міжнародна науково-практична конференція «Перспективи розвитку сучасної науки багатопрофільного університету в контексті інтеграції в міжнародний освітній простір», 27–28 березня 2025 року, Київ, Україна.

Публікації. За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 9 наукових праць, серед яких 3 статті у наукових фахових виданнях України, 1 публікація у виданні, що проіндексовано у базі даних Scopus, 1 авторське право на службовий твір та 5 тез доповідей на міжнародних конференціях.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота викладена на 162 сторінках, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел на 109 найменувань та 8 додатків. Робота ілюстрована 14 таблицями та 61 рисунком.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДТРИМКИ ЯКОСТІ І НЕПЕРЕРВНОСТІ 3D-ДРУКУ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ

1.1 Вибір технологій друку залежно від обраних цілей і складності геометричних форм об'єктів 3D-друку

3D-друк використовується в різних сферах, від інженерії до виробництва, стоматології, охорони здоров'я, ювелірних виробів та інших галузей. Технологія 3D друку має різноманітні застосування, від виготовлення візуальних та функціональних прототипів до виробництва деталей для кінцевого використання. Кожна з наявних на ринку технологій 3D-друку має свої переваги і обмеження, тому кожна з них підходить для певних цілей краще, ніж для інших. При виборі 3D принтера важливо врахувати технологію, яка найкраще відповідає вашим потребам і вимогам [100; 101].

Вибір технології 3D друку та матеріалу з правильними функціональними властивостями має вирішальне значення для забезпечення правильної роботи деталей.

1) *Розміри поля побудови та точність відтворення деталі (допуски).* Найбільш поширені принтери пропонують об'єм друку зі стороною куба розміром близько 200 мм, а варіанти великого формату досягають розміру 300x300x600 мм. Професійні настільні принтери можуть поставлятися у стандартних або широкоформатних моделях. Причому більшість стандартних розмірів є кубом зі стороною розміром 200 мм. Моделі більшого розміру можуть пропонувати область друку в 5–10 разів більше.

Наступне, що потрібно враховувати, коли йдеться про функціональні властивості, це допуски. Різні технології мають різні допуски. Вони використовують високоточні лазери для формування кожного шару матеріалу з надійними та відтворюваними результатами.

2) *Вибір технології 3D друку. Властивості матеріалів.* Насамперед потрібно розглянути види пластику для 3D принтера. Пластик для 3D друку, або

філамент, виготовляється у вигляді тонкої нитки, діаметром 1,75 мм та 3 мм. Найчастіше в базовій комплектації застосовуються нитки товщиною 1,75 мм, але деякі виробники 3D принтерів надають можливість встановити систему подачі триміліметрового пластику. Пластик для 3D друку налічує чимало різновидів, серед яких найпоширенішими є ABS та PLA пластик. Крім того, настільні 3D-принтери можна використовувати для створення металевих деталей шляхом виливки 3D-друкованих шаблонів із пластику [101; 104].

Неправильний вибір матеріалів у 3D-друці може призвести до різних проблем:

- якщо вибраний матеріал недостатньо міцний для ваших потреб, друкування деталей може призводити до ламкості або деформації;
- якщо матеріал не витримує високих або низьких температур, це може призвести до втрати форми або властивостей деталі під час експлуатації;
- деякі матеріали можуть мати інші властивості, ніж вказано в технічних характеристиках, що призводить до непередбачених результатів друку;
- деякі матеріали можуть погано прикладатися до підкладки або мати проблеми з адгезією, що призводить до дефектів на поверхні друку;
- інші проблеми можуть включати зміну розмірів під час охолодження, великі відхилення в геометрії або неправильну текстуру поверхні.

Враховуючи наведені вище проблеми, важливо ретельно вивчити властивості кожного матеріалу та його придатність до конкретного застосування перед початком 3D-друку.

Технологія 3D-друку почала набирати популярність у 1980-х роках, починаючи як метод швидкого прототипування. Основна мета цієї технології полягала у допомозі виробникам швидко та економно створювати моделі своїх продуктів. У 1983 році Чак Халл винайшов першу методику, яку назвав стереолітографією, що використовувала ультрафіолетове світло для затвердіння смоли у точних формах. У наступні роки з'явилися різні підходи, наприклад, моделювання наплавленого осадження, яке розплавляє пластик для формування шарів [101; 105].



Настільні 3D-принтери:

- призначені для використання на столі чи столі;
- компактні, легкі та підходять для домашнього використання, малого бізнесу та любителів;
- зазвичай мають розміри від 100x100x100 мм до 300x300x300 мм (або аналогічні розміри).



3D-принтери середнього розміру:

- більші за настільні принтери, але все ще підходять для більшості робочих місць;
- пропонують більший обсяг збірки порівняно з настільними принтерами, що робить їх придатними для створення прототипів, невеликого виробництва та освітніх цілей;
- розміри можуть коливатися від 300x300x300 мм до 600x600x600 мм або більше.



Промислові 3D-принтери:

- призначені для виробництва великих обсягів, швидкого створення прототипів і виробничих додатків;
- мають значно більший обсяг збірки порівняно з настільними принтерами та принтерами середнього розміру, що дозволяє виготовляти більші деталі та компоненти;
- розміри можуть варіюватися в широких межах, починаючи приблизно від 600x600x600 мм і досягаючи розміру кількох метрів.



Масштабні та серійні 3D-принтери:

- мають надзвичайно великий обсяг виробництва, здатні виготовляти повномасштабні прототипи, архітектурні моделі, меблі та навіть цілі будівельні компоненти.
- обсяг збірки може коливатися від кількох метрів до десятків метрів, залежно від конкретного застосування та галузі;
- класифікація розмірів 3D-принтерів може відрізнятися залежно від виробника та моделі. Деякі виробники можуть використовувати іншу термінологію або діапазони розмірів для класифікації своїх принтерів;
- крім того, розвиток технологій може призвести до розробки принтерів із різними розмірами та можливостями, що перевищують традиційні класифікації.

Рис. 1.1 – Загальна класифікація 3D-принтерів залежно від цілей та прикладних конструкторських завдань

Початково такі принтери були великими та дорогими, що обмежувало їхнє використання у промислових умовах. Однак із часом вони були удосконалені, з'явилися компактніші та доступніші моделі, що робить технологію доступною для любителів, шкіл і малих підприємств, радикально змінюючи спосіб створення та мислення щодо виробництва об'єктів.

3D-принтери – це передові пристрої, які перетворюють цифрові креслення на фізичні об'єкти шляхом адитивного виробництва. Цей процес передбачає нанесення матеріалів шар за шаром на основі точних геометричних даних з САД. Існують різні типи 3D-принтерів. Усі 3D-принтери відрізняються здатністю виготовляти складні конструкції з високою точністю та мінімальними відходами матеріалу. Вони знайшли застосування у різних галузях, забезпечуючи швидке створення прототипів, індивідуальне виробництво та виробництво складних компонентів.

Залежно від розміру 3D-принтери можна класифікувати на різні категорії. Ось загальна класифікація 3D-принтерів за розмірами, як показано на рисунку 1.1 нижче.

Вибір технології 3D друку залежить від цілей, які ви ставите перед проектом. Для того, щоб раціонально обрати одну або кілька технологій 3D-друку, потрібно враховувати такі фактори як: точність друку; міцність деталей, які будуть отримані після друку; швидкість друку; матеріали; розмір і масштаб, фінансовий бюджет.

На сьогоднішній день існує всього лише 5 технологій адитивного виробництва. Усі вони наведені на рисунку 1.2 нижче.

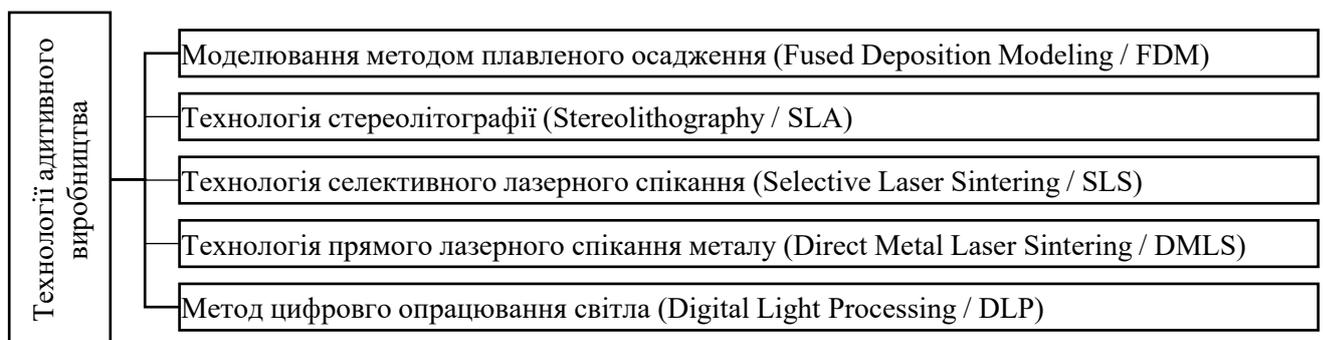


Рис. 1.2 – Класифікація сучасних технологій адитивного виробництва

Детальний опис кожної з технологій з метою розуміння і обрання найоптимальнішої з них наведено нижче. Слід зазначити, що вибір кращої технології є ключовим для серійного масштабного виробництва загалом.

1.2 Актуальні технології у 3D-друці об'єктів складної форми

1.2.1 Технологія пошарового наплавлення

Технологія Fused Deposition Modeling (FDM) також відомий як Fused Filament Fabrication (FFF) – це метод 3D-друку, який відомий своєю швидкістю, точністю та доступною вартістю. У FDM розплавлений пластик точно наноситься машиною для створення деталей, що дозволяє виготовляти деталі всього за один день.

Послуга 3D-друку за технологією FDM надає можливість створювати великі деталі на платформах розміром до 60 см x92 см x92 см. FDM також пропонує широкий вибір кольорів та термопластів промислової якості, включаючи ABS-пластик, ASA, полікарбонат та ULTEM, що робить цей метод найрізноманітнішим серед усіх процесів 3D-друку. Метод FDM є одним із найпоширеніших методів 3D-друку, який включає процеси плавлення, екструзії та нанесення термопластичної нитки на друкарську платформу для покрокового створення об'єктів. FDM, що широко використовується для швидкого прототипування, також може бути застосований для створення індивідуальних допоміжних засобів виробництва та невеликих деталей. Цей метод дозволяє друкувати великі об'єкти. FDM пропонує великий вибір термопластів промислової якості та різних кольорів, що робить його найрізноманітнішим серед усіх технологій 3D-друку. Найчастіше обирають матеріали FDM інженерного класу, такі як PLA+, ABS, ASA, PETG, PC та TPU, а також преміум-класу з високою міцністю та термічною стабільністю для використання в передових галузях автомобільної, аерокосмічної та медичної промисловості, таких як PEEK та ULTEM®. Технологія FDM використовується для виготовлення різних виробів, деякі з них наведені на рисунку 1.3.

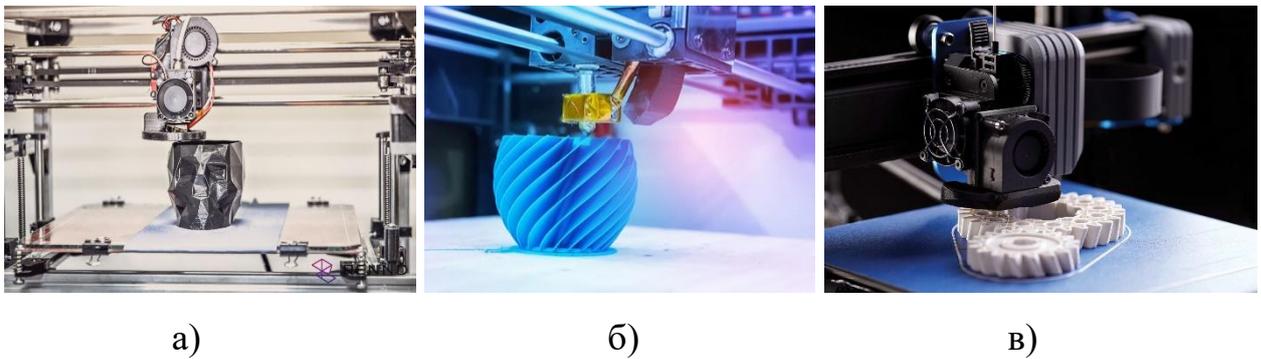


Рис. 1.3. Практичне застосування FDM у сучасному світі: а) – виробництво індивідуальних виробів; б) – виробництво в індустрії; в) – виробництво функціональних деталей

Для складних геометричних фігур при використанні FDM потрібні опорні конструкції, що збільшує витрату матеріалів, час і вимагає подальшої обробки.

1.2.2 Технологія стереолітографії в адитивному виробництві

Стереолітографія відноситься до групи технологій адитивного виробництва, відомих як фотополімеризація у ванні. Всі ці методи засновані на тому самому принципі, де джерело світла – лазер або проектор – використовується для застигання рідкої смоли в твердий пластик. Основна відмінність між ними полягає в розташуванні основних елементів, таких як джерело світла, будівельна платформа та резервуар зі смолою.

SLA є однією з трьох основних технологій у 3D-друку, поряд з FDM та SLS. Вона відноситься до категорії друку на смолі. Ще один підхід, який часто порівнюють із SLA, – це цифрова обробка світла (DLP), яка є еволюцією процесу SLA, використовуючи екран проектора замість лазера.

Хоча технологія SLA не так поширена, як FDM, насправді вона є найстарішою з технологій адитивного виробництва. Сам процес SLA був вперше розроблений на початку 1970-х років японським дослідником д-ром Хідео Кодама, який створив сучасний метод стереолітографії, використовуючи ультрафіолетове світло для застигання світлочутливих полімерів. Термін "SLA" був запроваджений Чаком Халлом, засновником компанії 3D Systems, у 1986 році, коли він запатентував цю технологію. За його визначенням, SLA – це процес

створення тривимірних об'єктів шляхом послідовного накладання шарів світлочутливого матеріалу. Однак технологія 3D-друку SLA не стала першою, яка набула широкого поширення. Коли наприкінці 2000-х років минули патенти, настільні 3D-принтери малого формату розширили доступ до адитивного виробництва, а FDM став популярним на настільних платформах. Хоча FDM був доступний і привертав велику увагу на початку поширення 3D-друку, високоточні результати та біосумісні матеріали, які мають важливе значення для професійного застосування, були важливими факторами для розвитку SLA. Малі SLA 3D-принтери принесли високу роздільну здатність і ширший доступ до різноманітних матеріалів, що раніше було доступне лише на промислових системах. Це значно розширило можливості використання 3D-друку у різних галузях, включаючи машинобудування, проектування, стоматологію, ювелірну справу та інші галузі.

SLA пропонує гнучкість у дизайні та параметрах налаштування. Приклади застосування технології наведено на рисунку 1.4.



Рис. 1.4. Практичне застосування SLA у сучасному світі: а) – аерокосмічна та автомобільна промисловість; б) – ювелірні вироби та мода; в) – стоматологічні та медичні моделі

SLA дозволяє виготовляти індивідуальні продукти, такі як персоналізовані подарунки, рекламні товари та спеціалізовані компоненти, адаптовані до індивідуальних вимог.

1.2.3 Технологія селективного лазерного спікання

Цей метод також відомий як «вибіркове лазерне спікання» (*Selective Laser Sintering, SLS*). Він є одним із варіантів технології 3D-друку, що широко

використовується в промисловості. SLS доступний тільки на дорогих професійних 3D-принтерах і відрізняється високою якістю виробів, що виготовляються. З його допомогою можна досягти результатів, близьких до відтворення виробів шляхом лиття під тиском.

Селективне лазерне спікання, також як і багато інших методів адитивного виробництва в промисловості, використовує порошки та порошоків суміші як матеріал. Цей метод дозволяє створювати повністю металеві об'єкти лише за кілька годин. Можливість виготовлення складних формою виробів пояснює його популярність серед промислових організацій у світі.

Як і в будь-якій іншій технології 3D друку, основною вимогою є наявність готової 3D моделі, що відповідає певним критеріям. Ця модель є основою створення виробу. Процес технології досить простий: спеціальний відсік 3D принтера заповнюється матеріалом, потім починається процес друку. Цікаво, що перед початком відтворення матеріал нагрівається до температури плавлення.

При використанні лазерної установки та скануючого дзеркала, промінь лазера спрямовується на потрібні ділянки порошку, спікаючи їх разом, створюючи шар за шаром. На рисунку 1.5 наведено основні сфери застосування технології 3D-друку SLS.

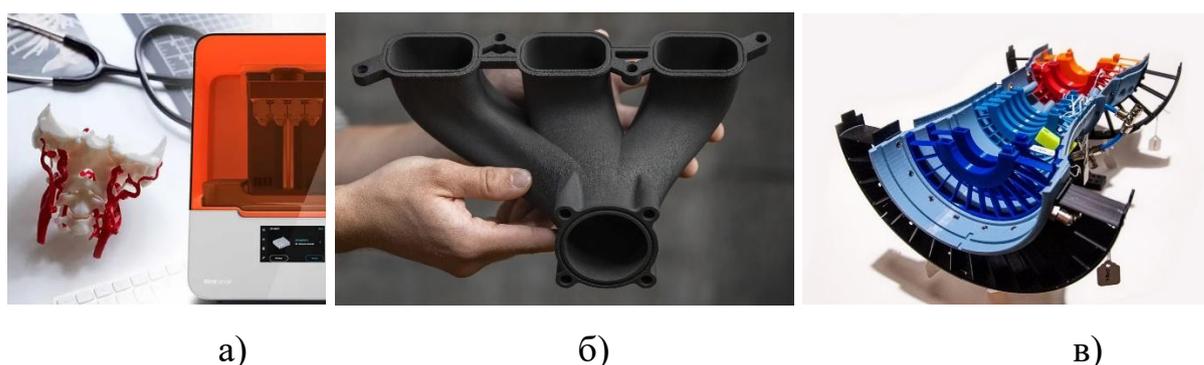


Рис. 1.5. Практичне застосування SLS у сучасному світі: а) – медицина; б) – автомобільне прототипування; в) – аерокосмічні компоненти

Після спікання першого шару механізм, що зрівнює поверхню, додає тонкий шар порошку зверху, і процес повторюється до тих пір, поки об'єкт не буде

повністю побудований. Це означає, що об'єкт створюється знизу вгору, і через безперервне заповнення камери порошком немає необхідності в структурах, що підтримують.

Загалом селективне лазерне спікання (SLS) цінується за його здатність виробляти функціональні деталі з високою міцністю, точністю та складністю, що робить його універсальною технологією, придатною для широкого спектру застосувань у різних галузях промисловості.

1.2.4 Технологія прямого лазерного спікання металу

Технологія прямого лазерного спікання металів (Direct Metal Laser Sintering, DMLS) широко використовується у промисловості та представлена безліччю професійного обладнання для 3D друку. Вона полягає у створенні виробів за заданими 3D моделями із спеціального металевого порошку за допомогою лазера. Методика прямого лазерного спікання металів багато в чому нагадує технології селективного лазерного спікання (SLS) та селективного лазерного плавлення металів (SLM).

Однак ці методики мають свої унікальні характеристики та переваги. Пряме лазерне спікання металів застосовується для адитивного виробництва металевих виробів практично будь-якої складності. Висока точність обладнання для такого друку 3D дозволяє мінімізувати похибки при відтворенні. Особливості цієї методики забезпечують виробам високу міцність.

Основний принцип роботи прямого лазерного спікання металів аналогічний до інших методик 3D друку. Основою для створення фізичного об'єкта є його тривимірна модель у відповідному форматі для 3D принтера. За допомогою спеціального програмного забезпечення модель готується до друку, встановлюються всі необхідні опції для відтворення. Потім підготовлений файл передається на 3D принтер, де розпочинається процес прямого лазерного спікання металів.

На цьому етапі ключовими компонентами є камера для металевого порошку, матеріал, спеціальний валик для вирівнювання і один або кілька лазерів.

Спочатку в камеру завантажуються певна кількість матеріалу, достатня створення одного шару. Цей порошок вирівнюється за допомогою спеціального пристрою, надлишки видаляються. Потім починається процес побудови моделі: порошок спікається лазером у формі першого шару. Потім додається новий шар матеріалу, що вирівнюється, і лазер спікає другий шар 3D моделі. Ця процедура повторюється, доки не буде створено повне відтворення виробу.

1.2.5 Інші технології і засоби адитивного виробництва

Смола використовується у сфері 3D-друку вже давно. Перший патент на цю технологію було видано у 1986 році Чарльзом Холлом, який розробив технологію стереолітографії (SLA). З часом з'явилися нові технології, що покращили процес 3D-друку. Зі закінченням терміну дії патентів з'явилися нові розробники на ринку. В даний час 3D-принтери на основі смоли представлені різними категоріями від доступних любителю до промислових професійних агрегатів. З різноманітністю пристроїв з'явилося багато технологій смол, таких як LCD, mSLA, DLP, SLA та інші (рисунок 1.6). Стандарти ISO поширюються на всі сфери діяльності в різних сферах. Це особливо важливо у промисловості, де ефективність забезпечується застосуванням однорідних очікувань та термінології. У контексті 3D-друку виникає деяка плутанина щодо використання терміну «стереолітографія» для опису всього процесу друку смолою. Але стереолітографія є лише первісною технологією. У стандарті ISO/ASTM 52900:2015, користувачі можуть знайти чітке визначення цієї технології.

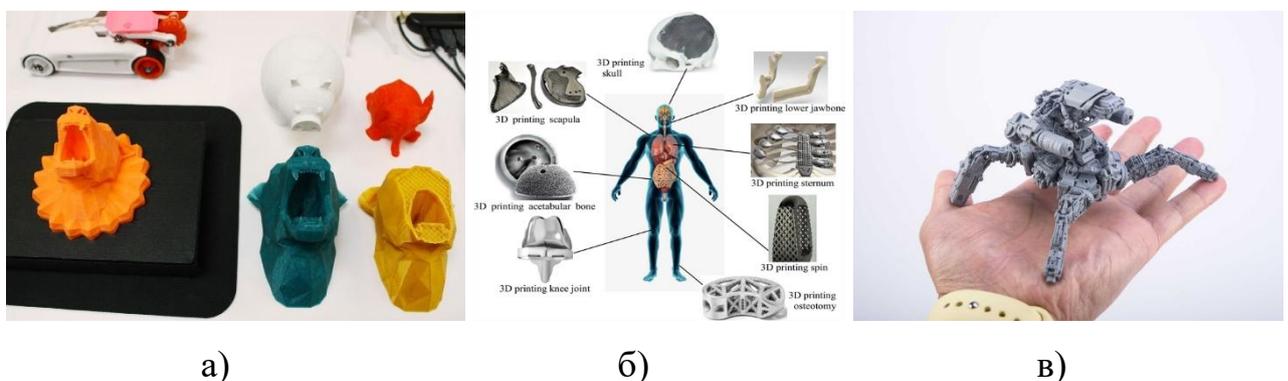


Рис. 1.6. Практичне застосування DLP у сучасному світі: а) – вивчення матеріалів і проведення експериментів; б) – медицина; в) – мініатюрні об'єкти

На рисунку 1.6 наведені різні галузі застосування даної технології 3D-друку. Усі технології 3D-друку з використанням смоли відносяться до полімеризації у ванні, тому що фотополімерна смола знаходиться у спеціальному резервуарі. Наприклад, у струменевому друку процес здійснюється через сопло.

1.3 Порівняльний аналіз технологій, матеріалів і методів адитивного виробництва

FDM є одним із найпоширеніших технологій адитивного виробництва. Вона працює шляхом видавлювання розплавленого матеріалу (зазвичай пластикової нитки) через нагріте сопло на друкарську платформу, де матеріал застигає і утворює шар. Після цього друкується наступний шар і процес повторюється до створення остаточної деталі [103; 104; 105]. Основні компоненти системи FDM включають екструдер для розплавленого матеріалу, рухому друкарську платформу та програмне забезпечення для керування друкованим процесом. FDM дозволяє створювати деталі середньої до високої точності і може використовуватися для широкого спектру додатків від прототипування до виробництва функціональних деталей. Переваги FDM включають відносно низькі витрати на обладнання та матеріали, широкий вибір доступних матеріалів (наприклад, ABS, PLA, PETG), можливість створення великих деталей та відносно високу швидкість друку для деяких програм. Однак у FDM є і недоліки, такі як обмеження в точності та деталізації в порівнянні з деякими іншими технологіями, видимі шари на поверхні деталей (що вимагають післядрукарської обробки для отримання гладкої поверхні), а також деякі обмеження за матеріалами порівняно з більш сучасними методами, такими як DMLS (пряме лазерне спікання металів) [101; 106–108].

SLA завдяки своїй здатності виробляти деталі з високою роздільною здатністю та детальні деталі має кілька застосувань у різних галузях промисловості, наприклад, технологія широко використовується для швидкого створення прототипів у розробці та проектуванні продуктів. Це дозволяє дизайнерам та інженерам швидко створювати точні прототипи для перевірки

форми, придатності та функціонування перед масовим виробництвом. З урахуванням принципів роботи SLA, ця технологія активно використовується у виробництві стоматологічних моделей, хірургічних напрямних, протезів та анатомічних моделей для медичного навчання та планування хірургічних операцій. Висока точність технології робить її придатною для створення складних стоматологічних і медичних пристроїв. SLA також використовується в аерокосмічній та автомобільній промисловості для створення прототипів компонентів, створення інструментів і пристосувань, а також виробництва функціональних прототипів деталей зі складною геометрією. Це допомагає тестувати та перевіряти конструкції перед виготовленням.

SLS використовує високопотужний лазер для вибіркового сплавлення порошкоподібних матеріалів, як правило, пластмас або металів, для створення твердих об'єктів. Ця технологія має кілька застосувань у різних галузях завдяки своїй здатності виготовляти складні деталі з високою міцністю та точністю. До прикладного застосування можна віднести широке використання для створення функціональних прототипів деталей і компонентів у розробці та проектуванні продуктів. Це дозволяє дизайнерам тестувати та перевіряти конструкції перед масовим виробництвом, особливо для деталей зі складною геометрією. Також дана технологія підходить для виробництва деталей і компонентів кінцевого використання, особливо в таких галузях, як аерокосмічна, автомобільна та споживчі товари. Деталі, виготовлені за допомогою SLS, можуть мати високу механічну міцність і витримувати вимогливі умови застосування. Ще одне з практичних застосувань SLS є використання її для виготовлення інструментів, пристосувань, пристосувань і форм для різних виробничих процесів. Здатність створювати складні та довговічні інструменти робить SLS цінним у галузях, які потребують швидких інструментальних рішень.

DMLS використовує потужний лазер для сплавлення металевих порошків шар за шаром для створення твердих металевих деталей. Цей процес також відомий як пряма лазерна плавка металу (DMLM) або лазерна плавка порошкового шару. DMLS може працювати з різними металевими матеріалами,

включаючи нержавіючу сталь, алюміній, титан, кобальт-хром і сплави нікелю. Це робить технологію придатною для виготовлення деталей зі специфічними механічними, термічними чи хімічними властивостями. DMLS здатний виробляти деталі зі складною геометрією, внутрішніми порожнинами та складними структурами, яких було б важко або неможливо досягти за допомогою традиційних методів виробництва. Дана технологія забезпечує високу точність розмірів і обробку поверхні, що робить його придатним для застосувань, де потрібні жорсткі допуски та гладкі поверхні. З використанням даної технології деталі будуються шар за шаром, що забезпечує свободу проектування та інтеграцію таких функцій, як внутрішні канали, ґратчасті структури та конформні канали охолодження. DMLS широко використовується в аерокосмічній галузі для виробництва легких, але міцних компонентів, таких як турбінні лопаті, кронштейни, конструктивні деталі та компоненти двигуна. Здатність створювати складні геометрії та легкі конструкції має вирішальне значення в аерокосмічних додатках. Також дана технологія DMLS використовується в медицині та стоматології для виготовлення імплантатів, протезів, ортопедичних пристроїв і зубних реставрацій. Біологічна сумісність певних металів, що використовуються в DMLS, робить технологію придатною для медичних імплантатів.

DLP використовує цифровий світловий проектор для затвердіння фотополімерної смоли шар за шаром, створюючи тверді об'єкти. Принтери, які використовують дану технологію, можуть створювати відбитки високої роздільної здатності з дрібними деталями та гладкою поверхнею, що робить їх придатними для застосувань, які вимагають складного дизайну. DLP-друк зазвичай швидший порівняно з іншими технологіями 3D-друку на основі смоли, такими як SLA (стереолітографія), що робить його ефективним для швидкого створення прототипів і невеликого виробництва. DLP-принтери забезпечують високу точність і точність розмірів, гарантуючи, що надруковані частини відповідають запланованим характеристикам конструкції. Технологія DLP підтримує різні фотополімерні смоли, включаючи стандартні смоли, смоли інженерного класу, гнучкі смоли та смоли стоматологічного класу, забезпечуючи

універсальність властивостей матеріалів. Технологія активно DLP використовується в зуботехнічних лабораторіях для виготовлення зубних моделей, коронок, мостів, ортодонтичних пристроїв і хірургічних напрямних. Це дозволяє професіоналам-стоматологам отримувати точні та індивідуальні стоматологічні рішення. Також DLP підходить для створення мініатюрних моделей, статуєток, архітектурних моделей і масштабних копій із складними деталями. Він популярний серед любителів, модельєрів і художників для створення детальних мініатюр.

Коротко характеристики для кожного з виду сучасного адитивного виробництва можна подати у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз технологій адитивного виробництва

Технології	FDM	SLA	SLS	DMLS	DLP
Принцип роботи	Екструзія термопластичних ниток	Лазерне затвердіння рідкої смоли	Лазерне спікання порошкових матеріалів	Лазерне плавлення металевих порошків	Світлове затвердіння фотополімерних смол
Матеріали	Широкий асортимент термопластів	Фотополімерні смоли	Різні пластмаси, метали, кераміка	Метали (наприклад, нержавіюча сталь, титан)	Фотополімерні смоли
Роздільна здатність	Середня	Висока	Висока	Висока	Висока
Фінішна обробка поверхні	Задовільна	Відмінна	Відмінна	Відмінна	Відмінна
Точність	Середня	Висока	Висока	Висока	Висока
Швидкість	Від середньої до високої	Від середньої до високої	Середня	Від середньої до високої	Від середньої до високої
Міцність	Середня	Середня	Висока	Висока	Від середньої до високої
Застосування	Прототипування, навчання, кастомні частини	Прототипування, стоматологія, ювелірні вироби	Аерокосмічна, автомобільна, медична	Аерокосмічна, автомобільна, медична	Ювелірні, стоматологічні, прототипування
Вартість	Від низької до середньої	Від низької до середньої	Висока	Висока	Від низької до середньої
Складність деталей	Обмежена складність	Висока складність	Висока складність	Висока складність	Висока складність
Постобробка	Мінімальна	Середня	Середня	Від середньої до високої	Середня

На основі вище наведених характеристик кожної з відомих технологій можна записати відповідні переваги і недоліки. Вони наведені у таблиці 1.2.

На основі огляду матеріалів, які застосовуються у адитивному виробництві з використанням FDM, можна виділити переваги у недоліки кожного з таких матеріалів. Основні зведені дані порівняння наведені у таблиці 1.3.

Таблиця 1.2. – Порівняльний аналіз переваг і недоліків технологій адитивного виробництва

Технології	Переваги	Недоліки
FDM	Низька вартість обладнання та матеріалів	Обмежена роздільна здатність і обробка поверхні
	Доступний широкий асортимент термопластичних матеріалів	Обмежена точність для складних геометрій
	Підходить для швидкого створення прототипів і простих деталей	Лінії шарів і видима ступінг
	Легка постобробка та видалення підтримки	Не ідеально підходить для високодеталізованих або складних дизайнів
SLA	Висока роздільна здатність і відмінна обробка поверхні	Відносно більш висока вартість обладнання та матеріалів
	Висока точність для складних конструкцій	Обмежений обсяг збірки для деяких машин
	Широкий асортимент доступних смоляних матеріалів	Обробка та постобробка смоли можуть бути брудними
	Підходить для стоматологічних, медичних та ювелірних робіт	Смола може бути чутливою до факторів навколишнього середовища
SLS	Висока міцність і довговічність деталей	Більш висока вартість в порівнянні з FDM і SLA
	Можливість використання різних матеріалів, включаючи пластмаси, метали, кераміку	Обмежена роздільна здатність у порівнянні з SLA
	Можлива складна геометрія та внутрішня структура	Поводження з порошком і переробка можуть бути складним завданням
	Підходить для функціональних прототипів і деталей кінцевого використання	Для видалення надлишків порошку може знадобитися постобробка
DMLS	Висока точність і акуратність металевих деталей	Висока вартість обладнання та матеріалів
	Широкий асортимент доступних металевих матеріалів	Обмежений обсяг збірки для деяких машин
	Можлива складна геометрія та легкі конструкції	Для деяких металів може знадобитися постобробка, наприклад термічна обробка
	Підходить для аерокосмічних, автомобільних та медичних застосувань	Обмежено металами та високотемпературними матеріалами
DLP	Друк з високою роздільною здатністю з дрібними деталями	Обмежені можливості матеріалів у порівнянні з іншими технологіями
	Відмінна обробка поверхні та гладкість	Необхідний процес обробки смоли та подальшого затвердіння
	Швидкість друку в порівнянні з деякими іншими методами на основі смоли	Обмежений обсяг збірки для деяких машин
	Підходить для ювелірних, стоматологічних і високодеталізованих прототипів	Смола може бути чутливою до факторів навколишнього середовища

Таблиця 1.3 – Порівняльний аналіз матеріалів 3D-друку при використанні Fused Deposition Modeling (FDM)

Матеріал	Переваги	Недоліки	Застосування
ABS	Міцний і ударостійкий	Може зменшуватися в розмірах при охолодженні	Прототипування, високоміцні деталі
PLA	Біологічно	Жорсткіший і крихкіший, ніж ABS	Прототипування, навчання, декоративні вироби
Поліамід	Висока ударостійкість і гнучкість	Вимагає особливих умов друку для запобігання деформації	Механічні частини, гнучкі конструкції
Полікарбонат	Дуже міцний і термостійкий	Вимагає високих температур друку	Високотемпературні деталі
Поліетилен	Хороша хімічна стійкість	Не дуже підходить для точних деталей через можливе змащення шарів	Трубопроводи, хімічно стійкі деталі
Термопластичний гумовий матеріал	Гнучкість і еластичність	Потрібен спеціалізований екструдер і установка для друку	Прототипування гнучких деталей, башмаків, ущільнювачів
PVA	Розчиняється у воді і використовується для підтримки друку	Не підходить для створення деталей, вимагає додаткової післядрукарської обробки	Підставка для друку, розчинна у воді

На основі огляду матеріалів, які застосовуються у адитивному виробництві з використанням SLS, аналогічно ж можна виділити переваги у недоліки кожного з таких матеріалів. Основні зведені дані порівняння наведені у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Порівняльний аналіз основних матеріалів, використовуваних у технології SLS

Матеріал	Переваги	Недоліки	Застосування
Акрилатна смола	Висока точність і деталізація	Матеріали можуть бути схильні до усадки	Прототипування, прикраси, високодеталізовані деталі
Епоксидна смола	Дуже висока деталізація та гладка поверхня	Матеріали можуть бути більш крихкими і менш гнучкими	Медичні моделі, ювелірні вироби, електронні компоненти
Поліуретанова смола	Гнучкість і еластичність	Матеріали можуть бути більш схильні до зносу та деформації	Гнучкі деталі, пружні прототипи, тестові вироби
Стоматологічна смола	Біосумісність і безпека при використанні в ортодонції і стоматології	Висока вартість та вимоги до обладнання для обробки та затвердіння смоли	Зубні імплантати, зубні протези, ортодонтичні апарати, моделі для хірургічного планування
Високоміцна смола	Висока міцність і стійкість до механічних впливів	Вища ціна та вимоги до обладнання для переробки смоли	Механічні частини, функціональні прототипи, деталі з високою вантажопідйомністю

На основі огляду матеріалів, які застосовуються у адитивному виробництві з використанням SLA, аналогічно ж можна виділити переваги у недоліки кожного з таких матеріалів. Основні зведені дані порівняння наведені у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Порівняльний аналіз основних матеріалів, використовуваних у технології SLA

Матеріал	Переваги	Недоліки	Застосування
Поліамід	Висока міцність і гнучкість	Можлива усадка матеріалу	Функціональні прототипи, механічні частини
Поліуретанові	Гнучкість і еластичність	Матеріали можуть бути менш міцними і зносостійкими	Гнучкі деталі, пружні прототипи, тестові вироби
Поліетилен	Хороша хімічна стійкість	Менш придатний для точних деталей через можливе змащення шарів	Трубопроводи, хімічно стійкі деталі
Поліпропілену	Низька щільність і хороша хімічна стійкість	Менш міцні і стійкі до механічних впливів	Пакувальні матеріали, легкі деталі
Поліамід з наповнювачем	Поліпшення механічних властивостей за рахунок додавання наповнювача	Може бути більш жорстким і менш гнучким	Спеціалізовані функціональні частини, прототипи
Металеві порошки (наприклад, нержавіюча сталь, алюміній, титан тощо)	Висока міцність і термостійкість	Потрібне спеціалізоване обладнання та процеси для друку	Виготовлення деталей з металу, прототипування виробів з металу
Керамічні порошки (наприклад, глинозем, карбід кремнію тощо)	Жароміцність і хімічна інертність	Потрібне спеціалізоване обладнання та процеси для друку	Виготовлення керамічних деталей, прототипування керамічних виробів

На основі огляду матеріалів, які застосовуються у адитивному виробництві з використанням DMLS, аналогічно ж можна виділити переваги у недоліки кожного з таких матеріалів. Основні зведені дані порівняння наведені у таблиці 1.6.

На основі огляду матеріалів, які застосовуються у адитивному виробництві з використанням DLP, аналогічно ж можна виділити переваги у недоліки кожного з таких матеріалів. Основні зведені дані порівняння наведені у таблиці 1.7.

Таблиця 1.6 – Порівняльний аналіз основних матеріалів, використовуваних у технології DMLS

Матеріал	Переваги	Недоліки	Застосування
Нержавіюча сталь	Висока міцність і стійкість до корозії	Обмежена складність геометрії	Виробництво функціональних металевих деталей, інструментів
Алюміній	Легка вага і хороша тепло- і електропровідність	Менш міцний у порівнянні з деякими іншими металами	Прототипування, виробництво легких металевих деталей, комплектуючих
Титан	Дуже висока міцність при невеликій вазі	Висока вартість матеріалу і обладнання	Виробництво медичних імплантатів, аерокосмічних компонентів
Кобальт-хром	Висока міцність і термостійкість	Обмежений вибір кольорів та оздоблень	Виготовлення медичних протезів, зубних конструкцій, інструментів
Інконель	Стійкість до високих температур і корозії	Потрібне спеціалізоване обладнання та процеси для друку	Виробництво деталей для високотемпературних та агресивних середовищ
Алюмінієві сплави	Різноманіття сплавів з різними властивостями	Може мати обмеження по міцності і довговічності	Виробництво різних металевих деталей і комплектуючих
Нікелеві сплави	Висока корозійна стійкість і жаростійкість	Висока вартість і обмежений вибір обробки	Виробництво деталей для аерокосмічної, енергетичної та хімічної промисловості

Як було зазначено вище, що неправильний підбір матеріалів може критично відобразитись не лише на якості друку, а й на стану 3D-принтера.

Таблиця 1.7 – Порівняльний аналіз основних матеріалів, використовуваних у технології DLP

Матеріал	Переваги	Недоліки	Застосування
Фотополімери	Високодеталізована та гладка поверхня	Обмежені механічні властивості	Ювелірні вироби, медичні моделі, високодеталізовані деталі
Еластомерні смоли	Гнучкість і еластичність	Може бути менш міцним і зносостійким	Гнучкі деталі, ущільнення, амортизуючі компоненти
Керамічні смоли	Термостійкість і хімічна стійкість	Обмежені механічні властивості, вимагають спеціалізованої обробки	Виробництво керамічних деталей, термостійких виробів, ізоляційних компонентів
Металовмісні смоли	Імітація властивостей металів	Висока вартість, вимагають спеціалізованої обробки	Виготовлення деталей з металевими властивостями, прикрас, декоративних елементів
Стоматологічні смоли	Біосумісність і безпека при протезуванні зубів	Висока вартість, вимагають спеціалізованої обробки	Виготовлення зубних протезів, ортодонтних апаратів, стоматологічних моделей

На основі проведено аналізу можна здійснювати вибір технології з урахування проекту, який буде розроблений з використанням сучасних технологій друку. Отриманий аналіз дає оцінку якості друку на основі кожної з п'яти існуючих технологій, що формує повне уявлення про особливості кожної з технологій, опис яких представлений у даній статті.

1.4 Зменшення помилок в процесі адитивного виробництва

Контроль якості 3D-друку дає змогу отримувати багато даних, які можуть бути використані для навчання моделей штучного інтелекту (ШІ) [56]. Кожне завдання друку включає досить багато даних, від моделі САПР до нарізки та відео друку. Усі ці дані можна використовувати у великих моделях штучного інтелекту та поєднувати з результатом друку як навчальні дані. Моделі штучного інтелекту можуть знаходити шаблони (див. як приклад рисунок 1.7), щоб визначити, які комбінації дизайну, налаштувань нарізки та налаштувань принтера викликають проблеми, а які призводять до чудової якості відбитків [57; 58].

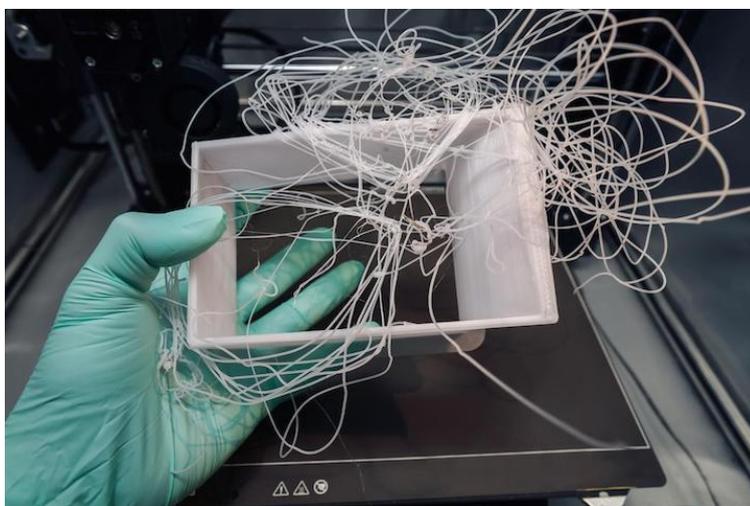


Рис. 1.7 – Приклад шаблону для навчання систем ШІ з метою визначення дефектів в ході адитивного виробництва (3D-друку)

Штучний інтелект також може виявляти та виправляти збій на льоту – моделі навчаються та запобігають появі дефектів і невдалих відбитків. Spaghetti Detection уже доступний і використовує комп'ютерне зір та машинне навчання для виявлення помилок друку [59–63]. Невдовзі моделі штучного інтелекту

зможуть коригувати відбитки в режимі реального часу, що призведе до кращих відбитків із меншою кількістю помилок.

1.5 Використання неймережевих технологій в керуванні якістю технологічних процесів адитивного виробництва

1.5.1 Згорткові нейронні мережі

Архітектура згорткової нейронної мережі схожа на структуру нейронних зв'язків у головному мозку людини. При їх створенні вчені черпали натхнення з організації зорової кори мозку. Окремі нейрони реагують на подразники лише в деякій області поля зору, відомої як поле сприйняття. Безліч полів сприйняття накладаються одне на одне, повністю покриваючи поле зору CNN (Convolutional Neural Network – згорткова нейронна мережа) [64–68; 106].

CNN здатна успішно фіксувати просторові та часові залежності на зображенні завдяки використанню відповідних фільтрів. Така архітектура, завдяки зменшенню числа задіяних параметрів і можливості повторного використання масштабів, дає кращу відповідність набору даних зображення [106–108]. Іншими словами, мережу можна навчити краще розуміти складність зображення. Приклад структури та загального принципу роботи CNN показаний на рисунку 1.8 на прикладі довільного зображення, яке можна отримати з камери [103; 104; 107].

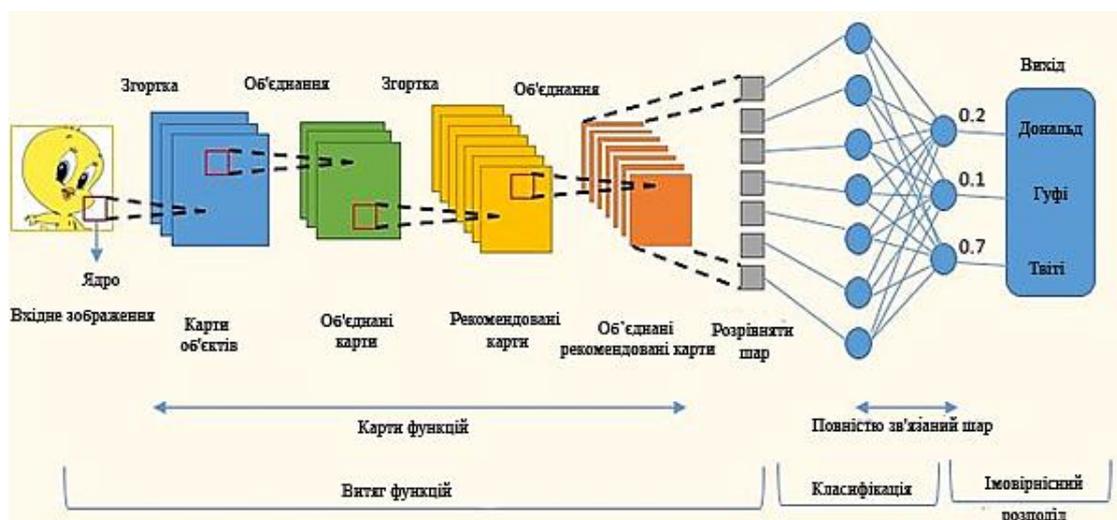


Рис. 1.8 – Будова і загальний принцип роботи згорткових нейронних мереж

У комп'ютерному зорі 3D-друк використовує різноманітні типи нейронних мереж для вирішення різних завдань, включаючи виявлення дефектів, аналіз зображень, керування процесом друку та інші [70–73]. Згорткові нейронні мережі ефективні для виявлення образів і фільтрації зображень. Вони широко використовуються для виявлення дефектів на поверхні поліграфічної продукції та аналізу якості друку [106].

1.5.2 Рекурентні нейронні мережі

Рекурентні нейронні мережі є досить сучасним інструментом, який має практичне застосування в області адитивного виробництва (рисунок 1.9). У технологіях АВ рекурентні нейронні мережі можуть використовуватися для прогнозування параметрів процесів друку, таких як температура друку або швидкість друку головної [73–77; 104–106]. Це сприяє поліпшенню якості виготовлення та уникненню виробничого браку.

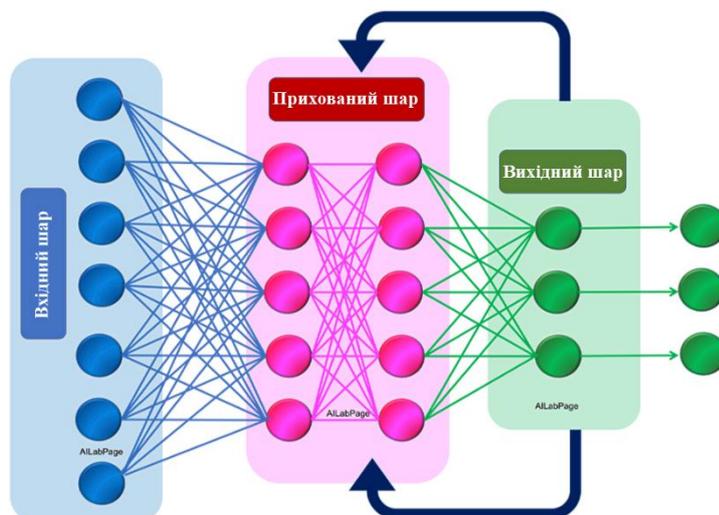


Рис. 1.9 – Приклад структури рекурентної нейронної мережі

Такого роду мережі можуть аналізувати дані про параметри друку і рекомендувати оптимальні настройки для того чи іншого типу матеріалу або деталі [78–84]. Це дає змогу більш ефективно використовувати матеріали і знижує витрати на виробництво.

У сучасних умовах рекурентні нейронні мережі можуть бути навчені виявляти відхилення від стандартних параметрів друку або виявляти дефекти на

виготовлених деталях. Це допомагає забезпечити якість виробництва та уникнути значних відходів 3D-друку. У серійному виробництві часто використовується аналіз даних, отриманих з датчиків у виробничих умовах. Це дає змогу вчасно виявити проблеми і уникнути збоїв в процесі виробництва [84–87].

Прогрес у галузі комп'ютерного зору багато в чому пов'язаний із застосуванням методів глибокого навчання. Складність 3D-реконструкції об'єктів і сцен полягає в тому, що одні і ті ж 3D-дані можуть бути представлені найрізноманітнішими способами, такими як сітки, вокселі, хмари точок. Класичні методи машинного навчання вимагають маркованих наборів даних, які часто недоступні. Використання генеративних змагальних нейронних мереж дозволяє виконувати їх тренування на непарних даних [89–93].

1.5.3 Генеративні нейронні мережі

Генеративна змагальна мережа (GAN) – це архітектура, яка складається з генератора та дискримінатора, налаштованих на роботу один проти одного (рисунок 1.10). GAN були вперше представлені в 2014 році дослідниками з Монреальського університету. Однією з основних переваг використання генеративних мереж у цьому контексті є їх здатність до автоматизованого проектування та оптимізації об'єктів [93–96]. Наприклад, GAN можуть генерувати нові дизайни на основі вхідних даних, таких як результати вимірювання або функціональні вимоги. Це дозволяє створювати складні та оптимізовані об'єкти без значного втручання людини в цей процес. GAN може створювати 3D-моделі з 2D-фотографій або відсканованих зображень. Наприклад, коли GAN використовується в охороні здоров'я, він поєднує сканування тіла та рентгенівські знімки для створення реалістичних зображень органів. Це допомагає при плануванні та моделюванні хірургічного втручання.

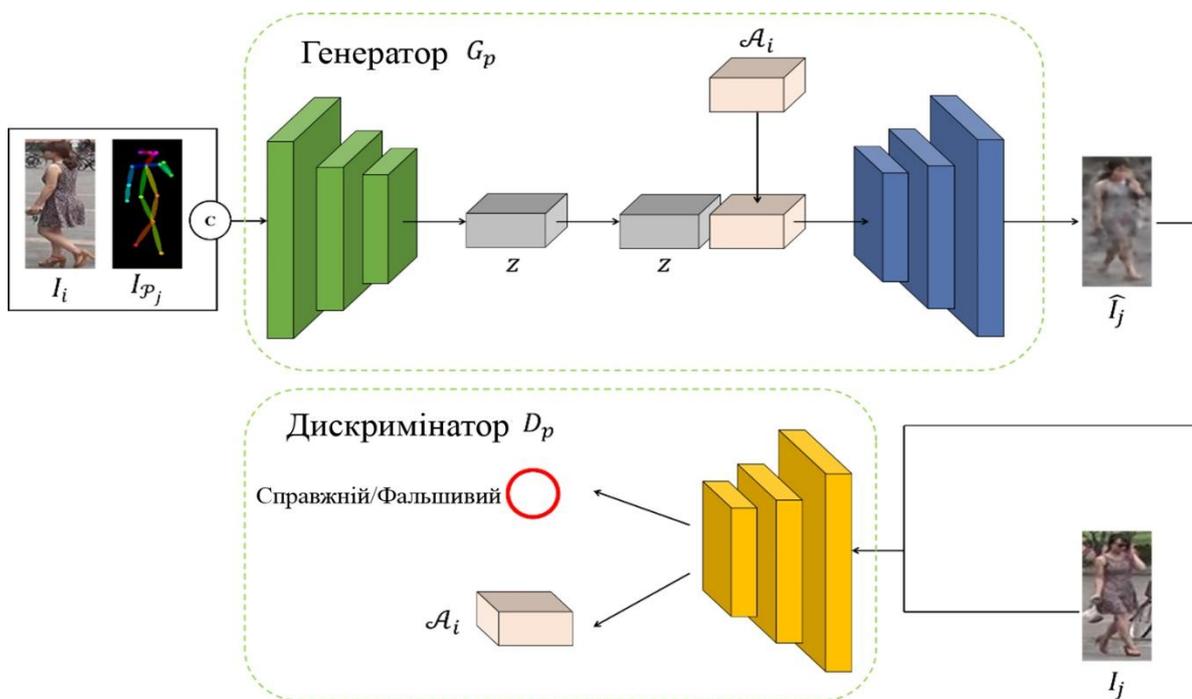


Рис. 1.10 – Загальна структура та принцип побудови та функціонування генеративних мереж

Слід зазначити, що генеративні мережі можуть використовуватися для поліпшення виробничих процесів, наприклад, за рахунок оптимізації параметрів друку або поліпшення якості виготовлених деталей.

У табл. 1.8 наведено кілька типів генеративних мереж, що використовуються в процесах адитивного виробництва в енергетичній промисловості.

Таблиця 1.8 – Практичне застосування генеративних мереж в АВ

Тип генеративної мережі	Області застосування
Генеративні змагальні мережі	<ul style="list-style-type: none"> – Генерація нових зображень та відео – Синтез музики і звуків – Генерація тексту та віртуальних об'єктів
Рекурентні генеративні мережі	<ul style="list-style-type: none"> – Генерація тексту та музики на основі попередніх шаблонів – Генерація рукописних зображень та стилізованих зображень
Трансформаторні генеративні мережі	<ul style="list-style-type: none"> – Генерація текстильного дизайну та 3D моделей
Диференційовані генеративні моделі (DGAN)	<ul style="list-style-type: none"> – Створення реалістичних зображень та анімації за допомогою глибокого навчання – Генерація реалістичних об'єктів для віртуальної реальності та ігор

Технічно GAN працює так, як описано нижче. Складне математичне рівняння становить основу всього обчислювального процесу [98–101]:

- генеративна нейронна мережа аналізує набір тренувальних даних та визначає його атрибути;
- дискримінаційна нейронна мережа також аналізує вихідні тренувальні дані та сама визначає атрибути;
- генеративна мережа модифікує деякі з них, додаючи шум (або щось інше) до певних атрибутів;
- генеративна мережа передає змінені дані в дискримінаційну мережу;
- друга частина мережа обчислює ймовірність приналежності згенерованих вихідних даних до вихідного набору даних;
- дискримінаційна мережа дає генеративній мережі деякі рекомендації щодо того, як зменшити рандомізацію векторів шуму в наступному циклі.

Дослідники з Массачусетського технологічного інституту (MIT), дочірньої компанії MIT Inkbit, і ETH Zurich створили систему 3D-струменевого друку, яка дозволяє друкувати вироби з використанням широкого спектру високопродуктивних матеріалів (рисунок 1.11). Нова технологія використовує комп'ютерний зір для сканування поверхні друку та регулювання кількості смоли, що подається кожним соплом, у режимі реального часу, що забезпечує точний і стабільний друк [76; 78; 100]. На відміну від традиційних струменевих 3D-принтерів, які вимагають частих зупинок і регулювань, ця система продовжує вносити корективи в режимі реального часу, не перериваючи процес друку. У результаті він приблизно в 650 разів швидший за аналогічні 3D-принтери.

Машинне навчання в цілому і комп'ютерний зір зокрема в даний час знаходять все більше застосувань у вирішенні завдань з промислової сфери [60; 95]. Від завдань з пошуку дефектних деталей на складальній лінії до управління безпілотними транспортними засобами повсюдно використовуються глибокі архітектури для виявлення численних об'єктів різних категорій, прогнозування просторового розташування об'єктів відносно один одного, пошуку дефектів, що виникають в процесі адитивного виробництва (рисунок 1.11, рисунок 1.12).

Щоб покращити функціональність тривимірних об'єктів, було розроблено для встановлення на звичайних механічних протезах замість кінцевого пристрою, який зазвичай складається з гачків або затискачів. Зберігається традиційний механізм дії, який дозволяє розгинати та згинати елементи об'єктів за допомогою рухів плечем. Основним удосконаленням у цій конструкції є механізм блокування великого пальця, який дозволяє обертати великий палець, отримуючи три різні типи захватів: цифровий захват, трипальцевий захват і бічний захват. Ця інструкція містить кроки для друку та складання.

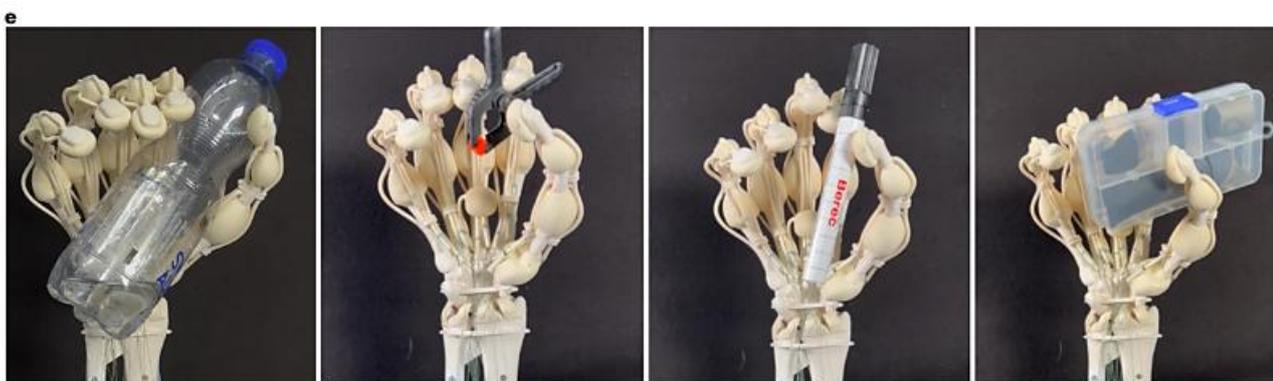


Рис. 1.11 – Створена Массачусетським технологічним інститутом та ETH Zurich, функціональна роботизована рука з сухожиллям

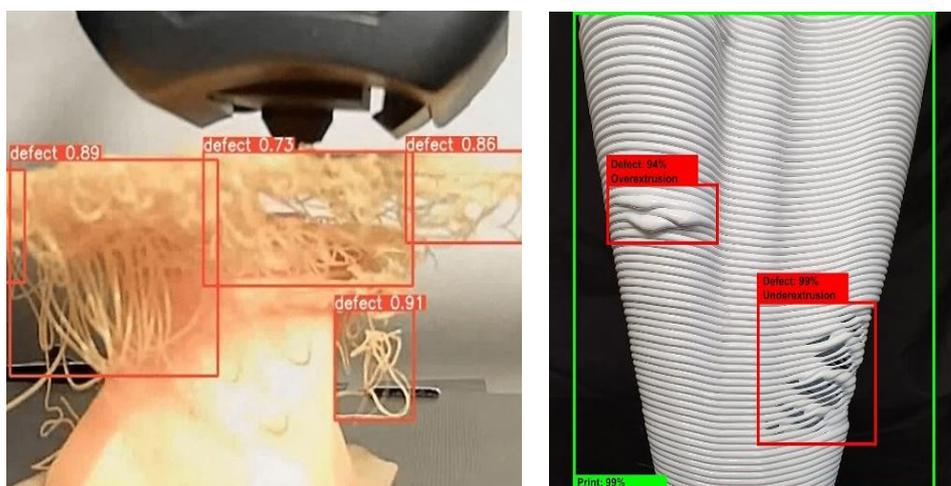


Рис. 1.12 – Приклад роботи інтелектуальної системи визначення ймовірності розпізнавання дефектів поліграфії при адитивному виробництві

У таблиці 1.9 стисло показані основні технології штучного інтелекту, які активно використовуються в процесах серійного адитивного виробництва.

Таблиця 1.9 – Технології штучного інтелекту в АВ

Технологія ШІ	Сфери застосування	Приклади використання	Переваги	Обмеження
Машинне навчання (ML)	Оптимізація параметрів друку, аналіз даних якості, прогнозування дефектів	Вибір оптимальних параметрів температури і швидкості друку; прогнозування утворення дефектів у реальному часі	Зниження кількості відходів, покращення якості друку	Потребує великого обсягу даних для навчання
Глибоке навчання (DL)	Комп'ютерний зір для виявлення дефектів, контроль процесу друку	Автоматизована перевірка якості шарів; виявлення дефектів на основі зображень з камер	Висока точність розпізнавання і аналізу	Високі обчислювальні витрати
Нейронні мережі	Моделювання матеріалів, оптимізація конструкції деталей	Прогнозування механічних властивостей матеріалів; розробка оптимальної геометрії виробу	Потенціал для створення більш міцних і легких деталей	Складність налаштування і навчання моделей
Генетичні алгоритми	Оптимізація конструкцій, пошук ефективних шляхів формування виробів	Генерація найкращих дизайнів для мінімізації ваги та максимізації міцності	Можливість швидко знаходити оптимальні рішення у великому просторі параметрів	Тривалий час обчислення для складних завдань
Комп'ютерний зір (CV)	Автоматизований моніторинг процесу друку, виявлення дефектів у режимі реального часу	Аналіз якості шару, розпізнавання відхилень у формі або кольорі виробів	Миттєва реакція на проблеми під час друку	Обмеження точності за умов поганого освітлення або низької якості камер
Підкріплювальне навчання (RL)	Управління процесом друку в режимі реального часу	Автоматичне регулювання швидкості і температури для досягнення оптимального результату	Можливість адаптації до динамічних умов процесу	Потребує багато часу для навчання і налаштування
Опрацювання природної мови (NLP)	Інтерактивна взаємодія з користувачами, створення технічної документації	Інтерфейси голосового управління, автоматичне створення звітів про процес друку	Полегшення взаємодії користувача з обладнанням	Обмежене використання в специфічних виробничих процесах
Експертні системи	Прийняття рішень про вибір матеріалів, оптимізацію процесів	Вибір найкращого матеріалу для заданих вимог; рекомендації з налаштування обладнання	Легкість інтеграції у виробничі процеси	Залежність від якості правил і бази знань

Слід зазначити, що з таблиці 1.9 випливає, що найбільш актуальними технологіями серійного адитивного виробництва є комп'ютерний зір.

Висновки до першого розділу

Виконаний порівняльний аналіз сучасних технологій 3D-друку дає можливість продовжити пошук оптимальних матеріалів для 3D-друку об'єкта складної форми, дає розуміння про цінову політику – це вартість витратних матеріалів, а також будувати математичні моделі підбору оптимальних матеріалів друку згідно з вимогами до друку такого складного об'єкта. У цьому розділі також наведено класифікацію та порівняльну характеристику найбільш поширених технологій – пошарового наплавлення, стереолітографії, селективного лазерного спікання та прямого лазерного спікання металу, що дозволяє здійснювати обґрунтований вибір відповідної технології друку залежно від складності проекту та функціональних вимог до виробу. Розділ містить огляд деяких розробок і методів, що використовуються в 3D-друці, а також виявлено основні обмеження та джерела похибок у процесі адитивного виробництва. У розділі також проведено аналіз методів і засобів інтелектуальних систем комп'ютерного зору на базі згорткових, рекурентних та генеративних нейронних мереж як ефективного засобу моніторингу та управління якістю на всіх етапах адитивного виробництва. Результати аналізу дозволяють сформулювати концептуальні підходи до створення автоматизованих і адаптивних систем контролю та підтримки якості у 3D-друці складних об'єктів, що є теоретичною та практичною основою для подальших досліджень у наступних розділах роботи. Слід зазначити, що перед обранням конкретної технології адитивного виробництва потрібно визначити цілі такого роду виробництва, його обсяги, загальні фінансові затрати, які необхідні для формування повного обсягу продукції, сферу застосування продуктів виробництва. Також важливим фактором адитивного виробництва є чіткий підбір технології друку під конкретний вид деталей, оскільки від цього залежать механічні характеристики продукту 3D-друку. Кожна технологія використовує різні матеріали друку, від яких залежить якість виробу та його довговічність.

Якщо матеріал не відповідає вимогам кінцевого продукту (наприклад, не має потрібної температурної стійкості, хімічної стійкості або інших характеристик), це може призвести до недоліків або непридатності виробу для використання. Використання невідповідного матеріалу може призвести до низької якості друку та погіршення характеристик міцності виробу. Як висновок, слід зазначити, що неправильно підібраний матеріал може не забезпечити необхідну міцність або жорсткість, що може призвести до деформацій чи поломок виробу.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛІ Й АПАРАТНО-ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ 3D-ДРУКУ

2.1 Проблема освітленості в ході аналізу кадрів для забезпечення якості друку елементів зразків

Проблема освітленості зображень стосується того, як світло впливає на якість та сприйняття зображення. Якщо освітлення недостатнє або нерівномірне, то це може призвести до втрати деталей зображення, низької контрастності або неправильного відтворення кольорів. Занадто яскраве освітлення може призвести до появи на зображенні ділянок, на яких деталі зникають через надмірну яскравість. До прикладу, у ході формування й аналізу різних зображень виникає проблема недостатньої освітленості зображення, тобто зображення виглядає темним, деталі важко розгледіти, особливо у тінях. Однією з особливих проблем є нерівномірне освітлення досліджуваного об'єкта, що ускладнює правильне сприйняття цього об'єкта, що може бути причиною збою контролю в ході забезпечення якості друку.

Для аналізу нерівномірно освітлених зображень та виправлення вище вказаних проблем, пов'язаних з вадами освітлення використовують математичний апарат різної складності. З метою вирівнювання освітлення у зображеннях використовують апарат матричної фільтрації (на основі принципів згортки), який відомий з курсу лінійної алгебри. Даний апарат є простим з точки зору програмної реалізації, а процесорний час, що необхідний для виконання реалізованого підходу, є порівняно малий. Апарат перетворення Лапласа та Фур'є є складнішим за попередній, але він на виході дає кращий візуальний результат виправлення нерівномірного освітлення у зображенні. Процесорний час на оброблення зображення даним математичним апаратом значно більший, ніж час оброблення зображення матричними фільтрами. Найбільш відомим математичним апаратом для вирішення проблеми оброблення нерівномірно освітлених зображень є варіаційний принцип, що передбачає перехід від

оптимізаційної постановки мінімізації квадратичного функціоналу спеціального виду до знаходження розв'язку рівняння Пуассона з відповідними граничними умовами, які відповідають поставленій задачі. На сьогоднішній день відомо багато методів розв'язання основних класів задач математичної фізики, а також оптимізаційних задач математичної фізики, де функціональними обмеженнями є рівняння, що описують конкретний процес. Основними обчислювальними методами знаходження чисельного розв'язку рівняння Пуассона є метод скінченних різниць і метод скінченних елементів. Слід зазначити, що метод скінченних різниць має перевагу перед методом скінченних елементів для вирішення проблеми вирівнювання нерівномірного освітлення у випадку, якщо досліджується область зображення об'єкта, який має дуже складну геометричну форму. У даній роботі використано метод аналізу зображення, що ґрунтується на варіаційному принципі та методі скінченних різниць.

В умовах сьогодення використання комп'ютерного зору і розпізнавання образів знайшли себе в побудові складних систем, які спрямовані на вирішення прикладних завдань ефективного і швидкого прийняття рішень в ході бойових дій у повітряному просторі. Такого роду прикладні завдання зводяться саме до задач розпізнавання образів. Очевидним є те, що системи розпізнавання образів передбачають використання просунутих методів й алгоритмів машинного навчання і штучного інтелекту для аналізу зображень і відеопотоків даних.

Побудова ефективних (високоточних) систем розпізнавання образів включає в себе підготовку даних, які використовуються для навчання таких систем. Більшість систем розпізнавання образів, в режимі реального часу використовують штучні нейронні мережі, згорткові штучні нейронні мережі, трансформери. Кожна система передбачає аналіз реальних даних, які отримуються в ході різних бойових дій на території країни.

Основна інформація про зображення об'єкта, яке отримується з камери, – це інтенсивність пікселів зображення, а також перепади інтенсивності пікселів у зображеннях, які формуються на основі методів виділення границь досліджуваних об'єктів. Нині існує багато методів виділення границь об'єктів, що

базуються на неперервному і дискретному математичних апаратах (наприклад, матричні фільтри (фільтр Собеля, фільтр Кенні, фільтр (оператор) Лапласа). Перевагою цих методів є те, що вони можуть ефективно застосовуватись в рівномірно освітлених зображеннях. Якщо ж зображення буде нерівномірно освітленим, то виникає проблема у посиленні градієнтів (що отримуються на основі градієнтних полів зображення) для затемнених або засвітлених фрагментів зображення.

Практичний результат даної роботи полягає у тому, що запропоновано метод вирівнювання нерівномірної освітленості у зображеннях та відеопотоках даних, який дає можливість вирівняти освітлення у відповідному графічному об'єкті з використанням варіаційного методу, який полягає у переході від оптимізаційної (саме варіаційної) моделі задачі до диференціальної постановки задачі. Слід зазначити, що після застосування процедури вирівнювання освітленості у зображенні зберігаються градієнтні поля початкового графічного об'єкта. Це дає можливість зберегти актуальну інформацію про границі спостережуваного об'єкта.

Перехід від варіаційної постановки задачі до диференціальної виконується з використанням відомого математичного інструменту – рівняння Ейлера-Лагранжа. Варіаційна (оптимізаційна) модель задачі полягає у знаходженні глобального мінімуму квадратичного функціонала, що містить два вагові доданки. Перший доданок передбачає мінімізацію відхилень шуканого (вирівняного по освітленості) зображення і вхідного (нерівномірно освітленого) зображення. Другий доданок передбачає мінімізацію дисперсії освітленості у зображенні. Граничні умови варіаційної задачі – умови другого роду (так звана «умова Неймана»), а саме: перша похідна на границі зображення. Граничні умови, як і для будь-якої задачі математичної фізики, математичного і комп'ютерного моделювання впливають з постановки задачі та відповідного режиму. Суть умов другого роду полягає у тому, що одержується збалансоване (рівномірно освітлене) зображення, середня освітленість якого майже не відрізняється від

початкового зображення, яке було спочатку нерівномірно освітленим, виходячи з реальних умов, де воно було одержане.

Очевидним є те, що кожен доданок у отриманій варіаційній моделі дає власний вклад у розв'язок задачі. Це означає наступне: якщо ваговий коефіцієнт першого доданка великий, а другого малий, то маємо отримати розв'язок задачі, який полягає у тому, що отримується той же графічний об'єкт, у якого вирівняно освітленість у тих частинах, які не містять граничні точки досліджуваного елемента об'єкта.

Вище вже було зазначено, що за використання рівняння Ейлера-Лагранжа можна легко перейти від варіаційної постановки задачі до диференціальної постановки задачі. У ході застосування цього рівняння отримується диференціальна модель, основним математичним об'єктом якої є рівняння математичної фізики (рівняння у частинних похідних) – рівняння Пуассона. Після переходу до диференціальної моделі для отриманого рівняння ми застосовуємо ті ж граничні умови, які були у початковій варіаційній моделі задачі – похідна на границі має дорівнювати нулю.

Для знаходження розв'язку задачі вирівнювання нерівномірної освітленості у зображенні з об'єктом для отриманого рівняння Пуассона з нульовими похідними на границі розрахункової області (зображення) застосовують різні обчислювальні методи (оскільки аналітичного розв'язку для даної задачі не існує) математичної фізики.

Слід зазначити, що розглянута модель легко може бути програмно реалізована на основі сучасних технологій програмування, наприклад, таких як Python, MATLAB та їхніх відповідних бібліотек, які дають можливість ефективно керувати пам'яттю, обчислювальними ресурсами (центральним процесором і графічним процесором). Легкість, чіткість і зрозумілість програмного коду разом з використанням потужних бібліотек, які спрямовані на розв'язання сучасних прикладних задач є серйозним інструментом розв'язання практичних задач комп'ютерного зору загалом.

2.2 Постановка завдання вирівнювання інтенсивності пікселів з метою поліпшення зображень з об'єктом 3D-друку

Основною метою вирівнювання інтенсивності (яскравості) пікселів зображень, які отримуються з використанням спеціальної камери полягає у формуванні якісних зразків у базі даних, за допомогою яких можна порівняно швидко і якісно навчити складну математичну модель нейромережевого типу. Тому, у такому випадку потрібно розробити математичну модель, яка буде препроцесингом даних перед навчанням такого роду моделі. У зв'язку з цим будемо будувати окрему математичну модель, яка дає можливість проаналізувати кожне зображення бази даних, а також його поліпшити, забезпечивши при цьому деталізацію усіх зразків (зображень / кадрів), при цьому поліпшити їх сприйняття як людським оком, так і комп'ютерним оком (комп'ютерним зором). Для побудови такої математичної моделі препроцесингу необхідно виконати аналіз класичних наближених методів пошуку розв'язків рівнянь математичної фізики другого порядку, які мають еліптичний тип. Вони є основою варіаційного підходу пуассонівського опрацювання зображень. Порівняльний аналіз методів полягає у визначення найшвидших наближених методів розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь з матрицею розрідженої структури [102].

Щоб скоригувати нерівномірне освітлення на зображенні, необхідно зберегти всі контури об'єктів, що присутні на зображенні. Для розрізнення окремих об'єктів слід використовувати інформацію про градієнт зображення, який у випадку повноколірного зображення у форматі RGB подається у вигляді двох матриць для кожного кольорового каналу [102]. Пуассонівський метод ґрунтується на збереженні відповідної інформації через використання квадратичного функціоналу $I_1(u)$, для якого потрібно знайти глобальний мінімум:

$$I_1(u) = \iint_G (u'_x - v'_x)^2 ds + \iint_G (u'_y - v'_y)^2 ds \rightarrow \min,$$

де u – функція, яка є шуканим зображенням, що отримується в результаті коригування нерівномірного розподілу яскравості пікселів, причому $u'_x = \partial u / \partial x$, $u'_y = \partial u / \partial y$, v – вхідне зображення з відповідно заданими градієнтними полями, що записують з використанням таких формул як $v'_x = \partial v / \partial x$, $v'_y = \partial v / \partial y$, G – розрахункова область, що подається у вигляді самого зображення. Зображення v – це зображення, для якого необхідно вирівняти яскравість пікселів [102].

У цьому випадку необхідно ввести ще один функціонал, що має наступну форму:

$$I_2(u) = \iint_G (u - \bar{u})^2 ds \rightarrow \min,$$

де \bar{u} – усереднене значення освітленості.

Останній функціонал виступає додатковим критерієм, який підлягає мінімізації [102]. Слід зауважити, що умова мінімізації функціоналу $I_2(u)$ спрямована на зменшення дисперсії інтенсивності пікселів. Відомо, що у контексті прикладної математики, зокрема в машинному навчанні, аналізі даних, регресійному та кореляційному аналізі, зменшення дисперсії є важливим критерієм, що забезпечує вирівнювання яскравості (інтенсивності) пікселів. Це, своєю чергою, сприяє покращенню якості зображення та його сприйняття. У такому разі маємо функціонал варіаційної постановки задачі вирівнювання нерівномірної освітленості у зображенні, який подається так [102]:

$$I(u) = \alpha_1 I_1(u) + \alpha_2 I_2(u) =$$

$$= \alpha_1 \left(\iint_G (u'_x - v'_x)^2 ds + \iint_G (u'_y - v'_y)^2 ds \right) + \alpha_2 \iint_G (u - \bar{u})^2 ds \rightarrow \min,$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1.$$

В останньому функціоналі $I(u)$, який полягає у зваженому врахуванні дисперсії, присутні два параметри $\alpha_1 > 0$ і $\alpha_2 > 0$. Ці числа і є ваговими коефіцієнтами. Вони визначають рівень впливу функціоналів $I_1(u)$ й $I_2(u)$ відповідно. Чим більше значення параметра α_1 відносно α_2 , тим сильніший вплив першого доданка суми функціоналів на критерія якості. Очевидно, що останній функціонал $I(u)$ можна записати й з одним (відносним) параметром [102]:

$$I(u) = \alpha_1 \left(1 \cdot I_1(u) + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \cdot I_2(u) \right) \sim I_1(u) + \lambda \cdot I_2(u) =$$

$$= \iint_G (u'_x - v'_x)^2 ds + \iint_G (u'_y - v'_y)^2 ds + \lambda \iint_G (u - \bar{u})^2 ds \rightarrow \min,$$

Такого роду математичні перетворення еквівалентності “ \sim ” вірні. Також слід зазначити, що $\lambda = \alpha_2/\alpha_1$, $\alpha_1 \neq 0$. Очевидним є те, що $\alpha_1 \neq 0$, бо при $\alpha_1 = 0$ втрачається вся інформації про початкове зображення (поле градієнтів зображення). Це означає, що при $\alpha_1 = 0$ задача втрачає будь-який сенс.

Для завершення математичної постановки варіаційної задачі необхідно також вказати відповідні граничні умови. Враховуючи той факт, що межі об'єктів на зображенні зазвичай не співпадають з межами всього зображення, а також те, що мінімізація дисперсії функціоналу I_2 досягається ефективніше за умови використання вільних (незакріплених) граничних умов, доцільно обрати саме такий підхід для подальшого аналізу [102]:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{Right} = \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{Left} = \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{Up} = \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{Down} = \left. \frac{\partial u}{\partial \bar{n}} \right|_{\Gamma} = 0,$$

де Γ – границя досліджуваного зображення.

Зазначена варіаційна задача може бути зведена до відповідної диференціальної постановки шляхом застосування рівняння Ейлера–Лагранжа, яке має наступний вигляд [102]:

$$\frac{\partial S(u, u'_x, u'_y)}{\partial u} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial S(u, u'_x, u'_y)}{\partial u'_x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial S(u, u'_x, u'_y)}{\partial u'_y} \right) = 0,$$

$$S(u, u'_x, u'_y) = (u'_x - v'_x)^2 + (u'_y - v'_y)^2 + \lambda(u - \bar{u})^2.$$

З урахуванням підінтегральної функції, отримаємо:

$$S'_u(u, u'_x, u'_y) = \frac{\partial S(u, u'_x, u'_y)}{\partial u} =$$

$$= \left((u'_x - v'_x)^2 + (u'_y - v'_y)^2 + \lambda(u - \bar{u})^2 \right)'_u = 2\lambda(u - \bar{u}).$$

$$S'_{u'_x}(u, u'_x, u'_y) = \frac{\partial S(u, u'_x, u'_y)}{\partial u'_x} = \left((u'_x - v'_x)^2 + (u'_y - v'_y)^2 + \lambda(u - \bar{u})^2 \right)'_{u'_x} =$$

$$= ((u'_x - v'_x)^2)'_{u'_x} + 0 + 0 = 2(u'_x - v'_x).$$

$$S'_{u'_y}(u, u'_x, u'_y) = \frac{\partial S(u, u'_x, u'_y)}{\partial u'_y} = \left((u'_x - v'_x)^2 + (u'_y - v'_y)^2 + \lambda(u - \bar{u})^2 \right)'_{u'_y} =$$

$$= 0 + ((u'_y - v'_y)^2)'_{u'_y} + 0 = 2(u'_y - v'_y).$$

Усі отримані вирази підставимо у рівняння Ейлера–Лагранжа. Отримаємо [102]:

$$2\lambda(u - \bar{u}) - \frac{\partial}{\partial x} (2(u'_x - v'_x)) - \frac{\partial}{\partial y} (2(u'_y - v'_y)) =$$

$$= -2 \left(\frac{\partial}{\partial x} (u'_x - v'_x) + \frac{\partial}{\partial y} (u'_y - v'_y) - \lambda(u - \bar{u}) \right).$$

Після спрощення отримаємо:

$$u''_{xx} + u''_{yy} - \lambda u = v''_{xx} + v''_{yy} - \lambda \bar{u}.$$

Останнє рівняння є рівнянням Пуассона. З урахуванням відповідних граничних умов (зокрема, умови нульового значення нормальної похідної на межі області), можна стверджувати, що якщо функція $u^*(x, y)$ є розв'язком цього рівняння, то будь-яка функція вигляду $u^*(x, y) + C$, де $C \in \mathbb{R}$ – довільна стала, також буде його розв'язком. Таким чином, продемонструємо наступне твердження [102]:

$$(u^* + C)''_{xx} + (u^* + C)''_{yy} - \lambda(u^* + C) = v_{xx} + v_{yy} - \lambda \overline{(u^* + C)}$$

на основі

$$(u^*)''_{xx} + (u^*)''_{yy} - \lambda u^* = v_{xx} + v_{yy} - \lambda \bar{u}^*.$$

Очевидно, що

$$\begin{aligned} (u^* + C)''_{xx} + (u^* + C)''_{yy} - \lambda(u^* + C) - (v_{xx} + v_{yy} - \lambda \overline{(u^* + C)}) &= \\ = (u^*)''_{xx} + (u^*)''_{yy} - \lambda u^* - \lambda C - v_{xx} - v_{yy} + \lambda \bar{u}^* + \lambda C &= \\ (u^*)''_{xx} + (u^*)''_{yy} - \lambda u^* + \lambda \bar{u}^* - v_{xx} - v_{yy} &= 0. \end{aligned}$$

Це означає, що для забезпечення єдиності розв'язку задачі доцільно покласти середнє значення функції $\bar{u} = 0$. Такий підхід дозволяє однозначно визначити розв'язок і, за потреби, легко масштабувати його до допустимого діапазону інтенсивностей пікселів — наприклад, у межах $[0; 1]$ для дійсних значень або $[0; 255]$ для цілих значень. Відповідне приведення може бути здійснене за допомогою класичної нормалізаційної формули [102]:

$$u = \frac{u - u_{min}}{u_{max} - u_{min}} \text{ або } u = \left[255 \cdot \frac{u - u_{min}}{u_{max} - u_{min}} \right].$$

Подальші обчислювальні експерименти проводитимуться для граничної задачі, сформульованої на основі рівняння Пуассона, яке є добре відомим та всебічно дослідженим у рамках класичної математичної фізики. Повні лістинги прикладного програмного забезпечення, що застосовувалося для чисельної реалізації, наведено в Додатку Б.

2.3 Проведення обчислювальних експериментів

2.3.1 Чисельний метод розв'язання задачі вирівнювання яскравості досліджуваних зображень з об'єктами друку

Маємо математичну модель, яка містить у собі відоме лінійне рівняння математичної фізики 2-го порядку виду [102]:

$$\lambda u - \Delta u = -\Delta f, \lambda > 0 \quad (2.1)$$

де

$$\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \Delta f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}.$$

У (2.1) вважаємо, що двовимірною функцією $f(x, y)$ задана. Це означає, що Δf знаходиться за класичними різницевими схемами. Граничні умови для рівняння (2.1) – рівність нулеві похідних [102].

Нехай потрібно записати різницеве рівняння для (2.1) [8–10]. Тоді використаємо центральні різницеві схеми для будь-якого вузла (x_i, y_j) , $i = \overline{1, N_x + 1}, j = \overline{1, N_y + 1}$. Кроки по просторовим координатам x та y покладемо рівними h_x, h_y . Тоді:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right|_{(x_i, y_j)} &\approx \frac{u(x_{i-1}, y_j) - 2u(x_i, y_j) + u(x_{i+1}, y_j)}{(h_x)^2}, \\ \left. \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right|_{(x_i, y_j)} &\approx \frac{u(x_i, y_{j-1}) - 2u(x_i, y_j) + u(x_i, y_{j+1})}{(h_y)^2}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Аналогічно запишемо другі похідні в (2.1) для відомої функції $f(x, y)$ у правій частині рівняння [102]:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_{(x_i, y_j)} &\approx \frac{f(x_{i-1}, y_j) - 2f(x_i, y_j) + f(x_{i+1}, y_j)}{(h_x)^2}, \\ \left. \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right|_{(x_i, y_j)} &\approx \frac{f(x_i, y_{j-1}) - 2f(x_i, y_j) + f(x_i, y_{j+1})}{(h_y)^2}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Уведемо такі позначення $u_{i,j} = u(x_i, y_j)$, $f_{i,j} = f(x_i, y_j)$, $i = \overline{1, (N_x + 1)}$, а також $j = \overline{1, (N_y + 1)}$. Тоді рівності (2.2) й (2.3) можна переписати так [102]:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right|_{(x_i, y_j)} &\approx \frac{u_{i-1,j} - 2u_{i,j} + u_{i+1,j}}{h_x^2}, \quad \left. \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right|_{(x_i, y_j)} \approx \frac{u_{i,j-1} - 2u_{i,j} + u_{i,j+1}}{h_y^2}, \\ \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_{(x_i, y_j)} &\approx \frac{f_{i-1,j} - 2f_{i,j} + f_{i+1,j}}{h_x^2}, \quad \left. \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right|_{(x_i, y_j)} \approx \frac{f_{i,j-1} - 2f_{i,j} + f_{i,j+1}}{h_y^2}, \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$i = \overline{2, N_x + 1}, \quad j = \overline{2, N_y + 1}.$$

Використовуючи (2.4), остаточно запишемо різницеву схему для (2.1):

$$\begin{aligned} \lambda u_{i,j} - \left(\frac{u_{i-1,j} - 2u_{i,j} + u_{i+1,j}}{h_x^2} + \frac{u_{i,j-1} - 2u_{i,j} + u_{i,j+1}}{h_y^2} \right) &= \\ = - \left(\frac{f_{i-1,j} - 2f_{i,j} + f_{i+1,j}}{h_x^2} + \frac{f_{i,j-1} - 2f_{i,j} + f_{i,j+1}}{h_y^2} \right), \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$i = \overline{2, N_x + 1}, \quad j = \overline{2, N_y + 1}.$$

Перетворимо рівняння (2.5), зібравши всі коефіцієнти біля точок (x_i, y_j) , (x_{i-1}, y_j) , (x_{i+1}, y_j) , (x_i, y_{j-1}) та (x_i, y_{j+1}) , і отримаємо 5-ти точкову різницеву схему для рівняння у нових позначеннях [102]:

$$\frac{u_{i-1,j} - 2u_{i,j} + u_{i+1,j}}{h_x^2} + \frac{u_{i,j-1} - 2u_{i,j} + u_{i,j+1}}{h_y^2} - \lambda u_{i,j} =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{f_{i-1,j} - 2f_{i,j} + f_{i+1,j}}{h_x^2} + \frac{f_{i,j-1} - 2f_{i,j} + f_{i,j+1}}{h_y^2}. \\
\frac{1}{h_x^2} u_{i-1,j} + \frac{1}{h_x^2} u_{i+1,j} + \frac{1}{h_y^2} u_{i,j-1} + \frac{1}{h_y^2} u_{i,j+1} - \left(\frac{2}{h_x^2} + \frac{2}{h_y^2} + \lambda \right) u_{i,j} = \\
&= \frac{f_{i-1,j} - 2f_{i,j} + f_{i+1,j}}{h_x^2} + \frac{f_{i,j-1} - 2f_{i,j} + f_{i,j+1}}{h_y^2}, \\
& i = \overline{2, N_x + 1}, \quad j = \overline{2, N_y + 1}.
\end{aligned} \tag{2.6}$$

У різницевому рівнянні (2.6) уведемо нові позначення [102]:

- числовий коефіцієнт біля $u_{i-1,j}$: $AX_{i,j} = 1/h_x^2$;
- числовий коефіцієнт біля $u_{i+1,j}$: $CX_{i,j} = 1/h_x^2$;
- числовий коефіцієнт біля $u_{i,j-1}$: $AY_{i,j} = 1/h_y^2$;
- числовий коефіцієнт біля $u_{i,j+1}$: $CY_{i,j} = 1/h_y^2$;
- числовий коефіцієнт біля $u_{i,j}$: $B_{i,j} = 2/h_x^2 + 2/h_y^2 + \lambda$;
- числовий коефіцієнт правої частини рівняння $D_{i,j}$:

$$D_{i,j} = \frac{f_{i-1,j} - 2f_{i,j} + f_{i+1,j}}{h_x^2} + \frac{f_{i,j-1} - 2f_{i,j} + f_{i,j+1}}{h_y^2}.$$

Використання цих позначень дає змогу представити (3.6) у виді наступного різницевого рівняння [102]:

$$\begin{aligned}
AX_{i,j} u_{i-1,j} + CX_{i,j} u_{i+1,j} + AY_{i,j} u_{i,j-1} + CY_{i,j} u_{i,j+1} - B_{i,j} u_{i,j} = D_{i,j}, \\
i = \overline{2, N_x + 1}, \quad j = \overline{2, N_y + 1}.
\end{aligned} \tag{2.7}$$

Рівняння (2.7) містить функцію $u(u_{i,j})$, яка визначена у кожній точці області розрахунку (x_i, y_j) , $i = \overline{2, N_x + 1}$, $j = \overline{2, N_y + 1}$.

Для розв'язання рівняння (2.7) можуть бути використані будь-які з відомих чисельних методів лінійної алгебри. Одним із ефективних підходів є застосування

багатосіткових методів, які дозволяють значно підвищити швидкість обчислень. Зазначимо також, що за умови $\lambda > 0$, різницеве рівняння (2.7) формує систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) з діагональною перевагою. Це означає, що в кожному рядку матриці коефіцієнтів модуль діагонального елемента не менший за суму модулів усіх інших елементів цього рядка, що, у свою чергу, сприяє покращенню збіжності чисельних методів розв'язання [102].

Для завершення побудови математичної моделі необхідно врахувати відповідні граничні умови. Розглянемо випадок, коли на всіх межах розрахункової області задається умова нульової нормальної похідної, тобто гранична умова другого роду. Нехай розрахункова область розміщена в межах прямокутної області $[x_a; x_b] \times [y_a; y_b]$. Для початку розглянемо нульову похідну на лівій границі [102]:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{(x_a; y)} = 0.$$

Виходячи з цього, коригуємо рівняння (2.7) [102]:

$$\begin{aligned} & AX_{2,j}u_{1,j} + CX_{2,j}u_{3,j} + AY_{2,j}u_{2,j-1} + \\ & + CX_{2,j}u_{2,j+1} - B_{2,j}u_{2,j} = D_{2,j}, \quad j = \overline{2, N_y + 1}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

З урахуванням того, що

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{(x_a; y)} \approx \frac{u_{2,j} - u_{1,j}}{h_x} = 0$$

маємо

$$u_{1,j} = u_{2,j}, \quad j = \overline{2, N_y + 1}. \quad (2.9)$$

Підставимо у залежність (2.8) вираз з умовою (2.9):

$$\begin{aligned} & AX_{2,j}u_{2,j} + CX_{2,j}u_{3,j} + AY_{2,j}u_{2,j-1} + \\ & + CX_{2,j}u_{2,j+1} - B_{2,j}u_{2,j} = D_{2,j}, \quad j = \overline{2, N_y + 1}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Остаточно вираз (2.10) подамо у вигляді [102]:

$$\begin{aligned} & CX_{2,j}u_{3,j} + AY_{2,j}u_{2,j-1} + CX_{2,j}u_{2,j+1} - \\ & - (B_{2,j} - AX_{2,j})u_{2,j} = D_{2,j}, \quad j = \overline{2, N_y + 1}. \end{aligned} \quad (2.11)$$

У рівнянні (2.11) слід помітити, що здійснюється коригування коефіцієнтів [102]:

$$\overline{B_{2,j}} = B_{2,j} - AX_{2,j}, \quad AX_{2,j} = 0, \quad j = \overline{2, N_y + 1}.$$

Далі коригуємо рівняння (2.7) на правій границі:

$$\begin{aligned} & AX_{N_x+1,j}u_{N_x,j} + CX_{N_x+1,j}u_{N_x+2,j} + AY_{N_x+1,j}u_{N_x+1,j-1} + \\ & + CX_{N_x+1,j}u_{N_x+1,j+1} - B_{N_x+1,j}u_{N_x+1,j} = D_{N_x+1,j}, \quad j = \overline{2, N_y + 1}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Враховуючи, що

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{(x_b; y)} \approx \frac{u_{N_x+2,j} - u_{N_x+1,j}}{h_x} = 0$$

отримаємо

$$u_{N_x+1,j} = u_{N_x+2,j}, \quad j = \overline{2, N_y + 1}. \quad (2.13)$$

Підставимо у рівняння (2.12) вираз з умовою (2.13). Одержимо [102]:

$$\begin{aligned}
& X_{N_x+1,j}u_{N_x,j} + CX_{N_x+1,j}u_{N_x+1,j} + AY_{N_x+1,j}u_{N_x+1,j-1} + \\
& + CX_{N_x+1,j}u_{N_x+1,j+1} - B_{N_x+1,j}u_{N_x+1,j} = D_{N_x+1,j}, \quad j = \overline{2, N_y + 1}.
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Остаточно (2.14) подамо у такому вигляді [102]:

$$\begin{aligned}
& AX_{N_x+1,j}u_{N_x,j} + AY_{N_x+1,j}u_{N_x+1,j-1} + CX_{N_x+1,j}u_{N_x+1,j+1} - \\
& - (B_{N_x+1,j} - CX_{N_x+1,j})u_{N_x+1,j} = D_{N_x+1,j}, \quad j = \overline{2, N_y + 1}.
\end{aligned} \tag{2.15}$$

У рівнянні (2.15) коригуємо коефіцієнти:

$$\overline{B_{N_x+1,j}} = B_{N_x+1,j} - CX_{N_x+1,j}, \quad CX_{N_x+1,j} = 0, \quad j = \overline{2, N_y + 1}.$$

Рівняння (2.15) матиме такий вигляд на нижній границі:

$$\begin{aligned}
& AX_{i,2}u_{i-1,2} + CX_{i,2}u_{i+1,2} + AY_{i,2}u_{i,1} + CX_{i,2}u_{i,3} - \\
& - B_{i,2}u_{i,2} = D_{i,2}, \quad i = \overline{2, N_x + 1}.
\end{aligned} \tag{2.16}$$

З урахуванням того, що

$$\left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{(x;y_a)} \approx \frac{u_{i,2} - u_{i,1}}{h_y} = 0$$

маємо

$$u_{i,1} = u_{i,2}, \quad i = \overline{2, N_x + 1}. \tag{2.17}$$

Підставимо у (2.16) умову (2.17) [102]:

$$\begin{aligned}
& AX_{i,2}u_{i-1,2} + CX_{i,2}u_{i+1,2} + AY_{i,2}u_{i,2} + CX_{i,2}u_{i,3} - \\
& - B_{i,2}u_{i,2} = D_{i,2}, \quad i = \overline{2, N_x + 1}.
\end{aligned} \tag{2.18}$$

Остаточно (2.18) перетворимо у такому вигляді:

$$\begin{aligned} & AX_{i,2}u_{i-1,2} + CX_{i,2}u_{i+1,2} + CX_{i,2}u_{i,3} - \\ & - (B_{i,2} - AY_{i,2})u_{i,2} = D_{i,2}, \quad i = \overline{2, N_x + 1}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

У рівнянні (2.19) здійснюється коригування коефіцієнтів:

$$\overline{B_{i,2}} = B_{i,2} - AY_{i,2}, \quad AY_{i,2} = 0, \quad i = \overline{2, N_x + 1}.$$

Коригуємо рівняння (2.7) на нижній границі:

$$\begin{aligned} & AX_{i,N_y+1}u_{i-1,N_y+1} + CX_{i,N_y+1}u_{i+1,N_y+1} + AY_{i,N_y+1}u_{i,N_y} + \\ & + CX_{i,N_y+1}u_{i,N_y+2} - B_{i,N_y+1}u_{i,N_y+1} = D_{i,N_y+1}, \quad i = \overline{2, N_x + 1}. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Оскільки

$$\left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{(x;y_b)} \approx \frac{u_{i,N_y+2} - u_{i,N_y+1}}{h_y} = 0$$

отримаємо

$$u_{i,N_y+1} = u_{i,N_y+2}, \quad i = \overline{2, N_x + 1}. \quad (2.21)$$

Підставимо у (2.20) умову (3.21):

$$\begin{aligned} & AX_{i,N_y+1}u_{i-1,N_y+1} + CX_{i,N_y+1}u_{i+1,N_y+1} + AY_{i,N_y+1}u_{i,N_y} + \\ & + CY_{i,N_y+1}u_{i,N_y+1} - B_{i,N_y+1}u_{i,N_y+1} = D_{i,N_y+1}, \quad i = \overline{2, N_x + 1}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Вираз (2.22) набуде вигляду:

$$\begin{aligned}
& AX_{i,N_y+1}u_{i-1,N_y+1} + CX_{i,N_y+1}u_{i+1,N_y+1} + AY_{i,N_y+1}u_{i,N_y} - \\
& - (B_{i,N_y+1} - CY_{i,N_y+1})u_{i,N_y+1} = D_{i,N_y+1}, \quad i = \overline{2, N_x + 1}.
\end{aligned}
\tag{2.23}$$

У (2.23) здійснюється коригування коефіцієнтів:

$$\overline{B_{i,N_y+1}} = B_{i,N_y+1} - CY_{i,N_y+1}, \quad CY_{i,N_y+1} = 0, \quad i = \overline{2, N_x + 1}.$$

У разі прямокутної розрахункової області особливу увагу необхідно приділити визначенню значень у кутових точках, де можуть виникати неоднозначності внаслідок перетину граничних умов. Одним із можливих підходів до усунення таких труднощів є використання умовної апроксимації, зокрема шляхом призначення значення в кутовій точці як середнього арифметичного двох найближчих суміжних граничних значень. Такий підхід забезпечує безперервність розв'язку та узгодженість застосованих граничних умов [102].

$$\begin{aligned}
u_{1,1} &= \frac{u_{1,2} + u_{2,1}}{2}, \quad u_{N_x+2, N_y+2} = \frac{u_{N_x+1, N_y+2} + u_{N_x+2, N_y+1}}{2}, \\
u_{1, N_y+2} &= \frac{u_{1, N_y+1} + u_{2, N_y+2}}{2}, \quad u_{N_x+2, 1} = \frac{u_{N_x+1, 1} + u_{N_x+2, 2}}{2}.
\end{aligned}
\tag{2.24}$$

Слід зазначити, що граничні вузли області, визначеної в (2.24), безпосередньо не залучаються до обчислювальних процедур, оскільки 5-точкова різницева схема не включає ці точки під час апроксимації диференціального оператора [102].

2.3.2 Перевірка чисельного методу на різних зображеннях

Різницева математична модель, представлена у попередньому розділі, була протестована на 30 різних зображеннях (програмний код відповідного модуля наведено в Додатку Б). Результати вимірювання часу обробки для перших шести

зображень наведено в таблицях 2.1–2.4. Найвищу ефективність продемонстрував алгоритм блокової прогонки при розв’язанні дискретного аналога поставленої задачі вирівнювання нерівномірного розподілу інтенсивності пікселів. Також задовільні результати були отримані за допомогою алгоритму з бібліотеки Scipy мови програмування Python. Важливо відзначити, що обчислювальні методи лінійної алгебри виявляються більш ефективними при розв’язанні систем лінійних алгебраїчних рівнянь у випадках, коли матриці мають діагональну перевагу [102].

Таблиця 2.1 – Часові характеристики пошуку розв’язку задачі вирівнювання яскравості пікселів з використанням методу Зейделя для шести різних зображень [102]

№ зображення	К-сть пікселів по вертикалі	К-сть пікселів по горизонталі	Загальна к-сть пікселів	Час виконання програми для $\lambda=0.0001$, сек	Час виконання програми для $\lambda=0.0005$, сек	Час виконання програми для $\lambda=0.001$, сек	Час виконання програми для $\lambda=0.01$, сек
1	216	197	42552	0,210937312	0,089896336	0,056801848	0,01207815
2	450	297	133650	0,389937561	0,136101551	0,081752021	0,02127122
3	216	218	47088	0,225398738	0,123498702	0,067352707	0,01153639
4	249	186	46314	0,076201501	0,042581451	0,031306698	0,00780742
5	192	256	49152	0,255173569	0,191466012	0,100008831	0,01471437
6	341	404	137764	0,589075354	0,301040809	0,196141768	0,03152153

Таблиця 2.2 – Часові характеристики пошуку розв’язку задачі вирівнювання яскравості пікселів з використанням вбудованих засобів Python, а саме бібліотеки Scipy для розв’язання системи лінійних рівнянь [102]

№ зображення	К-сть пікселів по вертикалі	К-сть пікселів по горизонталі	Загальна к-сть пікселів	Час виконання програми для $\lambda=0.05$, сек	Час виконання програми для $\lambda=0.1$, сек	Час виконання програми для $\lambda=0.15$, сек	Час виконання програми для $\lambda=0.2$, сек
1	216	197	42552	0,003438	0,002027	0,00184	0,00128
2	450	297	133650	0,006911	0,004971	0,00313	0,00261
3	216	218	47088	0,002791	0,001621	0,00123	0,00091
4	249	186	46314	0,003047	0,001878	0,00159	0,00095
5	192	256	49152	0,004353	0,002112	0,00171	0,00131
6	341	404	137764	0,008112	0,005327	0,00345	0,00262

Чим більша різниця між модулем діагонального елемента та сумою модулів інших елементів рядка (для кожного рядка), тим швидше збігається ітераційний метод. Помилка обчислень для ітераційних методів, результати яких наведено в зазначених таблицях, становить $\varepsilon = 10^{-7}$.

Далі протестуємо той самий різницевий метод на основі вже відомого наближеного алгоритму поздовжньо-поперечної прогонки (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Часові характеристики пошуку розв’язку задачі вирівнювання яскравості пікселів з використанням методу поздовжньо-поперечної прогонки для шести різних зображень [102]

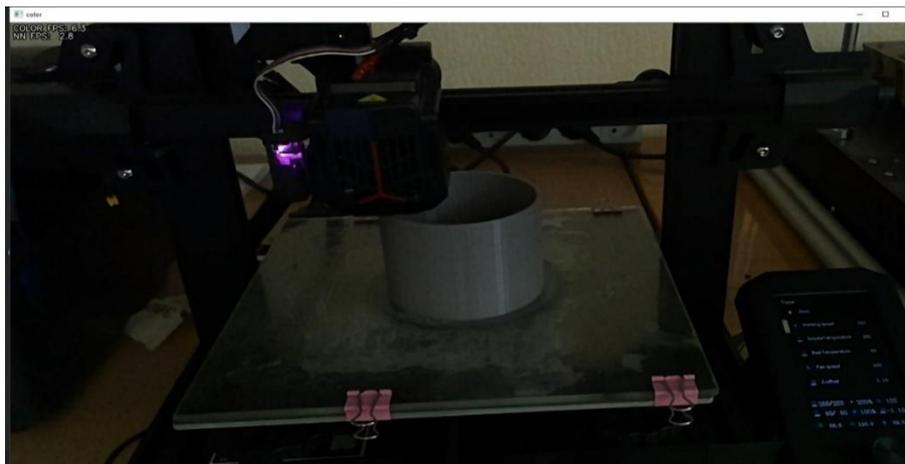
№ зображення	К-сть пікселів по вертикалі	К-сть пікселів по горизонталі	Загальна к-сть пікселів	Час виконання програми для $\lambda=0.0001$, сек	Час виконання програми для $\lambda=0.0005$, сек	Час виконання програми для $\lambda=0.001$, сек	Час виконання програми для $\lambda=0.01$, сек
1	216	197	42552	0,13429230	0,09056245	0,08532415	0,09177863
2	450	297	133650	0,01377897	0,01531005	0,01567527	0,01533334
3	216	218	47088	0,01409682	0,01637427	0,01681701	0,01563258
4	249	186	46314	0,09475455	0,07616487	0,06050883	0,06152226
5	192	256	49152	0,06123956	0,06735462	0,04519732	0,04193212
6	341	404	137764	0,13429230	0,09056275	0,08513215	0,09177863

Те ж саме зробимо для аналітичного методу блокової прогонки, що дає можливість отримати точний розв’язок задачі з урахуванням того, що дискретний аналог рівняння Пуассона має чітку розріджену і блокову структуру (результати наведено у таблиці 2.4).

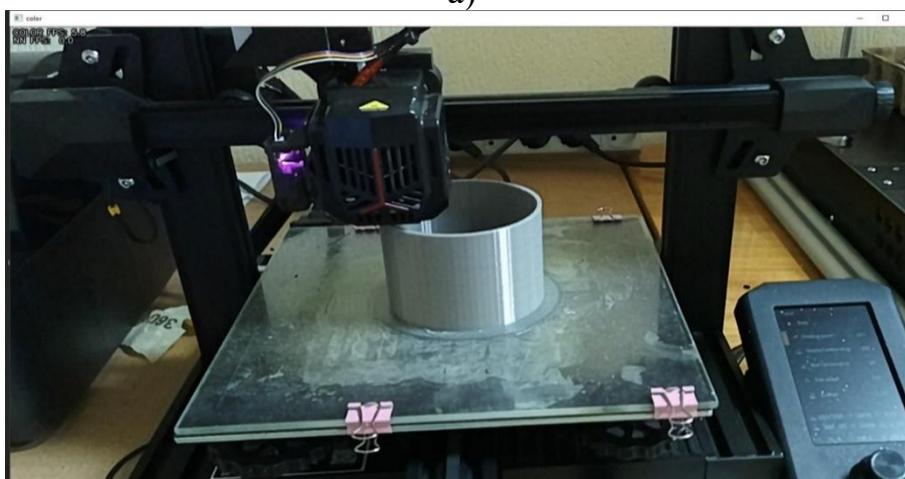
Таблиця 2.4 – Часові характеристики пошуку розв’язку задачі вирівнювання яскравості пікселів з використанням методу блокової-прогонки для шести різних зображень [102]

№ зображення	К-сть пікселів по вертикалі	К-сть пікселів по горизонталі	Загальна к-сть пікселів	Час виконання програми для $\lambda=0.05$, сек	Час виконання програми для $\lambda=0.1$, сек	Час виконання програми для $\lambda=0.15$, сек	Час виконання програми для $\lambda=0.2$, сек
1	216	197	42552	0,078135991	0,07168536	0,068275028	0,069264852
2	450	297	133650	0,013946464	0,01665014	0,013836376	0,018284613
3	216	218	47088	0,016022084	0,01541467	0,013604557	0,017517877
4	249	186	46314	0,065097637	0,06055524	0,050360774	0,051381867
5	192	256	49152	0,039356135	0,03993877	0,044371414	0,042931808
6	341	404	137764	0,078135991	0,07168536	0,068275028	0,069264852

Візуальні результати виконання програми наведено нижче.



а)



б)

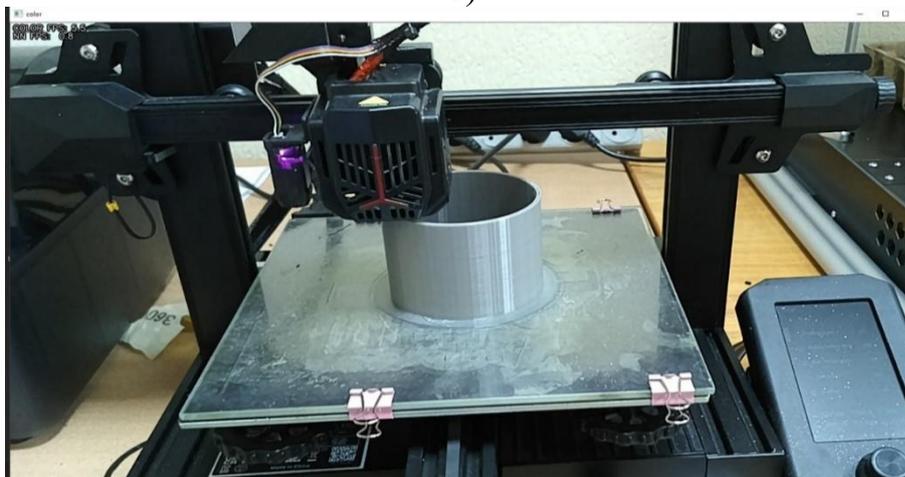


Рис. 2.1 – Ілюстрація роботи алгоритму для зображення:
а) – оригінальне зображення, отримане з камери; б) – результат вирівнювання освітлення вбудованими засобами камери для 3D-принтера; в) – результат вирівнювання освітленості зображення зі збереженням його основних елементів

Як видно з рисунка 2.1, зображення у результаті застосування алгоритму має кращий розподіл інтенсивності пікселів.

2.4 Загальна структура розробленого програмного забезпечення

У реалізації запропонованих завдань центральну роль відіграв набір добре відомих бібліотек, доступних в середовищі мови програмування Python. Зокрема, бібліотеки Keras і TensorFlow стали основою для створення та реалізації моделей. Завдяки можливостям цих бібліотек була розроблена та навчена складна архітектура нейронної мережі, яка була адаптована до специфічних вимог задачі класифікації зображень.

Для реалізації задачі також були використані додаткові бібліотеки, зокрема NumPy, PIL (бібліотека для обробки зображень у Python) та Matplotlib. NumPy, відомий своїми високопродуктивними можливостями для роботи з масивами, став основою для попередньої обробки даних зображень і виконання математичних операцій, необхідних для навчання моделі. Бібліотека PIL, у свою чергу, забезпечила зручність маніпулювання зображеннями, спрощуючи виконання таких операцій, як зміна розміру, обрізка та нормалізація зображень.

На рисунку 2.2 зображена структура розробленого прикладного забезпечення, що є одним з практичних результатів виконання дисертаційної роботи. Відповідне програмне забезпечення наведене у Додатках Б–В. Свідectво про реєстрацію авторського права наведено у Додатку А до роботи [109].

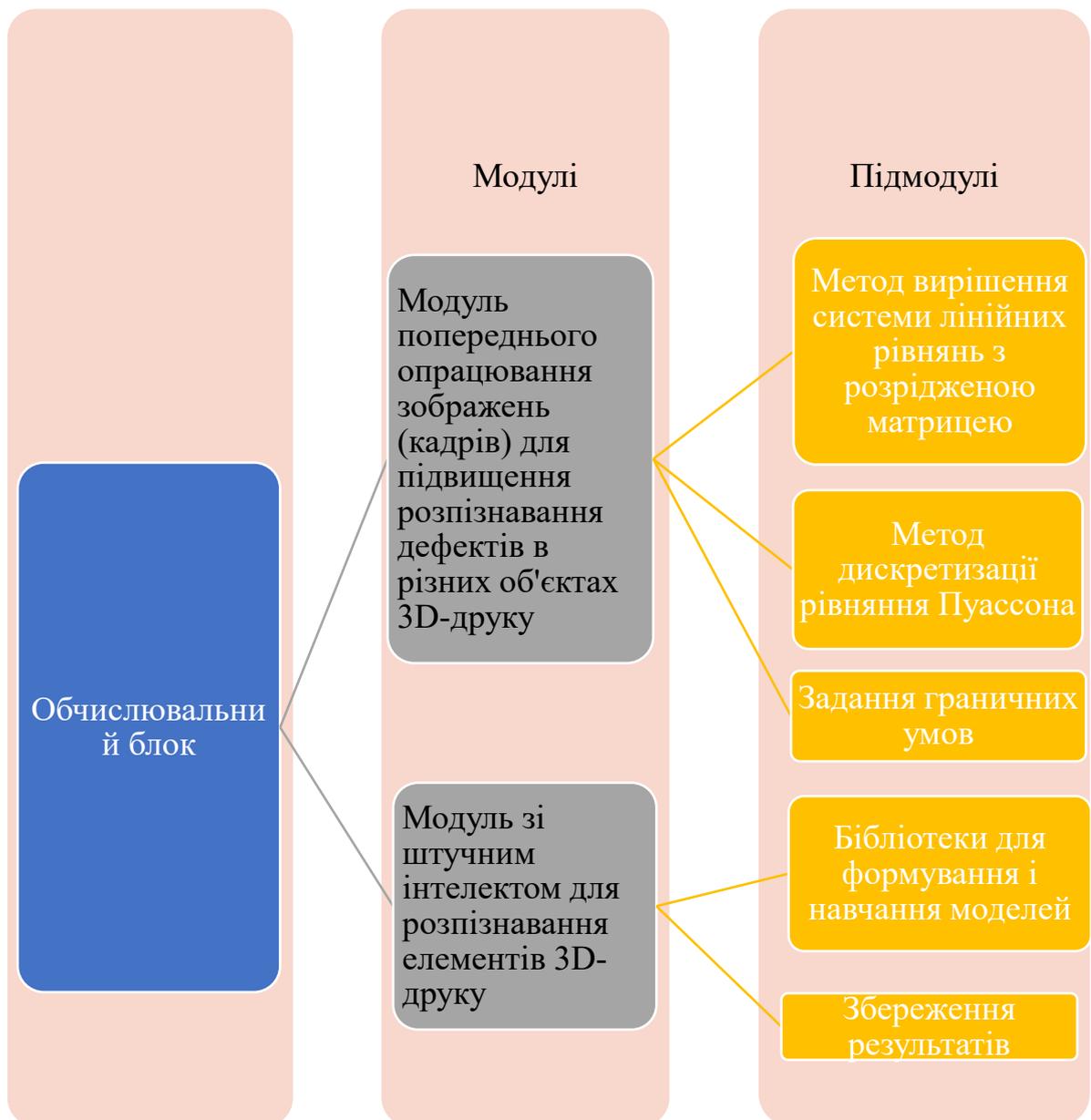


Рис. 2.2 – Загальна структура розробленого прикладного програмного забезпечення

Лістинги програм розробленого програмного забезпечення наведені у Додатках Б–Г даного звіту.

На рисунку 2.3 наведена реалізована схема апаратно-програмної частини зв'язку між програмним забезпеченням, 3D-принтером і камерою для забезпечення якості друку, яка полягає у визначенні дефектів і зупинці друку у разі виявлення поширених дефектів, які виникають в ході АВ.



Рис. 2.3 – Реалізована взаємодія апаратної і програмної частини розробленого прикладного програмного забезпечення

Основні фізико-механічні характеристики матеріалів, які були використані в ході дослідження наведені у Додатку Е до дисертаційної роботи.

Висновки до другого розділу

Розділ містить практичну реалізацію і перевірку моделей та програмних засобів, які забезпечують ефективне функціонування запропонованого методу контролю якості 3D-друку. Акцент зосереджений на проблемі нерівномірної яскравості пікселів у ході аналізу відеокадрів, що використовуються для виявлення дефектів 3D-друку в режимі реального часу. Встановлено, що нерівномірне освітлення суттєво впливає на точність виявлення порушень геометрії та структури надрукованих зразків [102]. Технічно і математично сформульовано задачу вирівнювання яскравості пікселів як важливий етап попередньої обробки зображень. Запропоновано чисельний метод її розв'язання, який базується на математичному згладжуванні освітленості при збереженні контрастності ключових елементів об'єкта. Проведено обчислювальні експерименти, які підтвердили ефективність підходу: результати тестування на різних зображеннях продемонстрували підвищення точності візуального аналізу та зниження помилкових спрацьовувань у системі контролю. Описано загальну структуру розробленого програмного забезпечення, яке забезпечує інтеграцію методів попередньої обробки, аналізу кадрів та візуалізації результатів в єдину систему підтримки якості 3D-друку. Система має модульну архітектуру, що дозволяє адаптувати її до різних типів адитивного обладнання та умов освітлення.

Проведений аналіз класичних обчислювальних методів еліптичних рівнянь математичної фізики другого порядку, які є основою варіаційного підходу пуассонівського опрацювання зображень в ході процесів адитивного виробництва, а саме для забезпечення якості 3D-друку. Метод Зейделя показав себе найгірше за часом, метод блокової прогонки з використанням вбудованої бібліотеки Python Scipy дали найкращий результат за часом. Встановлено, що для отримання кращих показників за часом для конкретної точності краще всього застосовувати багатосіткові наближені методи, які дають можливість суттєво зменшити кількість ітерацій, а значить – зменшити час на виконання програми. Швидкість ітераційних методів й алгоритмів буде вищою, якщо виконувати обрахунки в нормальній системі (від 0 до 1), а не в класичній (від 0 до 255).

РОЗДІЛ 3

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ДОСЛІДНИХ ЗРАЗКІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ВИРОБІВ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

3.1 Вибір матеріалів для реалізації дослідних зразків

ABS є аббревіатурою від Acrylonitrile Butadiene Styrene, найпопулярнішого інженерного полімеру – це полімер, який широко використовується завдяки своїм механічним властивостям. Одне з його численних застосувань – клавіатура комп'ютерів. ABS-пластик є аморфним (не має далекого порядку, пов'язаного з кристалами) термопластом (таким, який може багаторазово переплавлятися) з температурою переходу скла (коли він стає значно м'якшим) 105°C і, таким чином, дає змогу легко виготовляти вироби методом екструзії або лиття під тиском, при відносно низьких температурах $204\text{--}238^{\circ}\text{C}$. Він також легко піддається механічній обробці.

ABS-пластик значно відрізняється від найбільш часто використовуваного полімеру, поліетилену, який складається з одного мономера ($-\text{CH}_2 - \text{CH}_2 -$), що повторюється знову і знову. Пластик ABS виготовляється шляхом емульсійного процесу з різних кількостей мономерів акрилонітрилу (15–35%), 1,3 бутадієну (5–30%) і стиролу (40–60%) (див. рисунок. 3.1) і називається терполімером. Діапазон складів означає, що формула для ABS-пластику не є фіксованою, але може бути записана як $(\text{C}_8\text{H}_8)_x(\text{C}_4\text{H}_6)_y(\text{C}_3\text{H}_3\text{N})_z$, де x, y і z представляють пропорції акрилонітрилу, бутадієну та стиролу. Цей діапазон складів також означає, що щільність ABS-пластику відповідно варіюється від $900\text{--}1530 \text{ кг/м}^3$, тобто від менш щільного, ніж вода (1000 кг/м^3), до важчого за воду.

ABS-пластик замінив полістирол у багатьох сферах застосування через його чудову міцність, а також кращу обробку – навіть незважаючи на те, що він вдвічі дорожчий і становить близько 1,5 долари за 1 кг. Він також має відмінну стійкість до деяких кислот і лугів. Оскільки полімери ABS є термопластичними, їх можна

відносно легко переробити (рисунок 3.1). У 2015 році ABS залишалась лідером в галузі інженерного пластику з обсягом ринку в 22,3 мільярда доларів, який, як очікувалось, буде зростати на 6% щорічно.

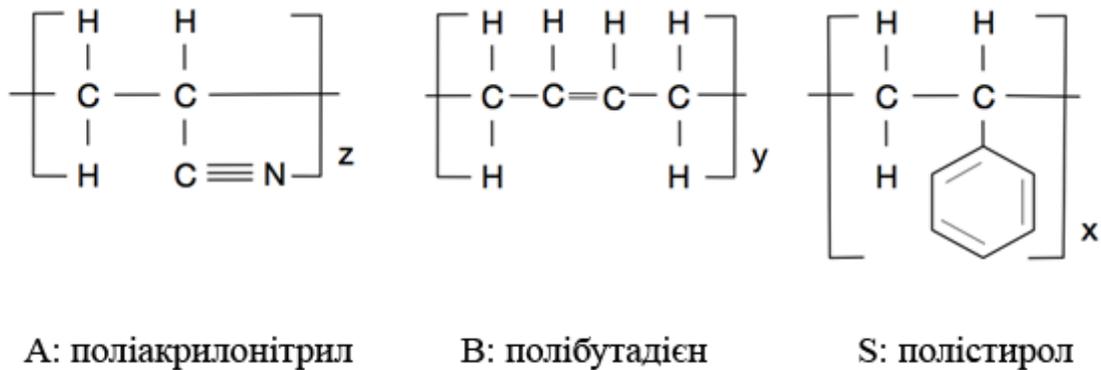


Рис. 3.1 – Мономери, які використовуються в різних пропорціях для отримання ABS-пластика

Проектування деталей для ABS-CF10 відбувається за аналогічним процесом проектування інших деталей FDM, і слід дотримуватися рекомендацій щодо проектування адитивного виробництва (DFAM) (наприклад, використовуючи самонесучі кути, де це можливо, дотримуючись мінімальної товщини стінки, забезпечуючи належний зазор для вузлів). Загальний перелік керівних принципів DFAM можна знайти в документації FDM Design Guidelines.

Для ABS-CF10 та інших низькотемпературних FDM матеріалів розчинна система підтримки використовується для підтримки матеріалу моделі в місцях звису для запобігання провисання. Хоча опору можна зняти вручну, вона також розчиняється в миючому розчині P400SC WaterWorks™. Самонесучі кути (кути, що перевищують 43 градуси від будівельного валика) слід використовувати за можливості для зменшення потреби в опорному матеріалі.

Обробка деталей

Щоб досягти оптимальної візуальної якості, рекомендується, щоб поверхні, надруковані на опорному матеріалі, були якомога рівнішими. Щоб покращити якість дрібних деталей за допомогою висоти шару 0,005 дюйма (0,127 мм),

необхідно зменшити ширину контуру за допомогою параметра «Контур інструмента» в Insight. Слід бути обережним при цьому, щоб не зменшити ширину контуру занадто сильно, оскільки це може призвести до проблем зі зчепленням. Параметри обробки за замовчуванням слід використовувати, якщо користувач не є достатньо просунутим у Insight або GrabCAD Print і визначив, що змінені значення дають кращі результати для конкретної геометрії. Адаптивний зріз можна використовувати на шарах ABS-CF10 висотою 0,010 дюйма (0,254 мм) і 0,007 дюйма (0,1778 мм).

Упаковка деталей

Кілька деталей ABS-CF10 можуть бути упаковані разом в одній збірці. Це часто скорочує час збірки і має використовуватися для збільшення використання системи шляхом усунення простоїв, коли оператори відсутні. Для перевірки різних фізико-технічних і механічних характеристик було всього розроблено 34 зразки. Загальна форма зразка (лопатки) наведена на рисунку 3.2.

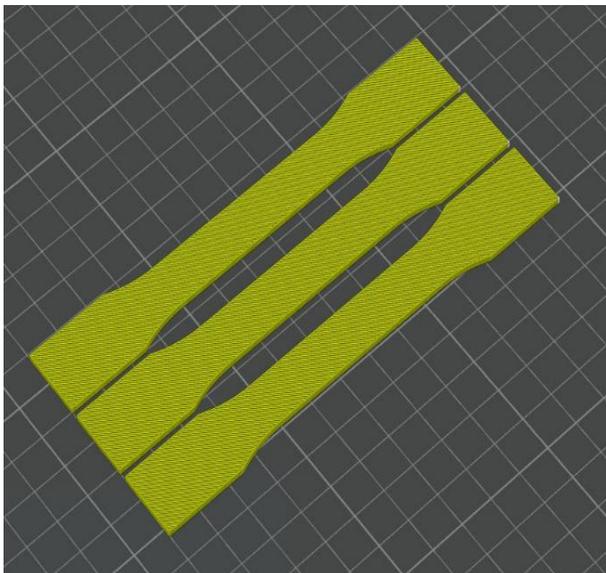


Рис. 3.2 –Зразок лопатки в AutoDesk Fusion



Рис. 3.3 – Дослідні зразки, що тестувались на розрив

Інші зразки було згруповано по матеріалах, як показано на рис. 3.3.

3.2 Програмне проєктування дослідних зразків

Першим середовищем розроблення і проєктування зразків був Autodesk Fusion 360. Autodesk є комплексною хмарною платформою для автоматизованого проєктування, інженерного аналізу та комп'ютерно-підтримуваного виробництва, що інтегрує широкий спектр інструментів для повного циклу розробки продукту [100]. Програмний комплекс забезпечує гібридне моделювання, поєднуючи параметричні, прямі та поверхневі методи створення тривимірної геометрії, включаючи підтримку T-spline для моделювання складних органічних форм. Функціонал інженерного аналізу охоплює структурні, теплові та модальні дослідження, що дозволяє проводити скінченно-елементний аналіз (FEA) для оцінки міцнісних характеристик, термічних навантажень і динамічної поведінки конструкцій. У сфері комп'ютерного виготовлення реалізовано генерацію оптимальних траєкторій інструментів для верстатів з числовим програмним керуванням, включаючи 2.5-осьову, 3-осьову та 5-осьову обробку з вихідним кодом у форматі G-коду. Платформа використовує хмарні технології для забезпечення колаборативної роботи в реальному часі, автоматичної версійності проєктів та зберігання даних. Вбудований модуль генеративного дизайну застосовує алгоритми штучного інтелекту для автоматизованої оптимізації форми деталей з урахуванням заданих механічних навантажень, матеріалів та виробничих обмежень. Система знаходить застосування в машинобудуванні, аерокосмічній та автомобільній промисловості, а також у промисловому дизайні, завдяки крос-платформенній сумісності, інтеграції з іншими продуктами Autodesk (рис. 3.4) та гнучкій моделі підписки. Використання даного програмного комплексу дозволяє суттєво прискорити процес розробки (рис. 3.5), знизити витрати на виробництво та підвищити якість кінцевих продуктів [100].

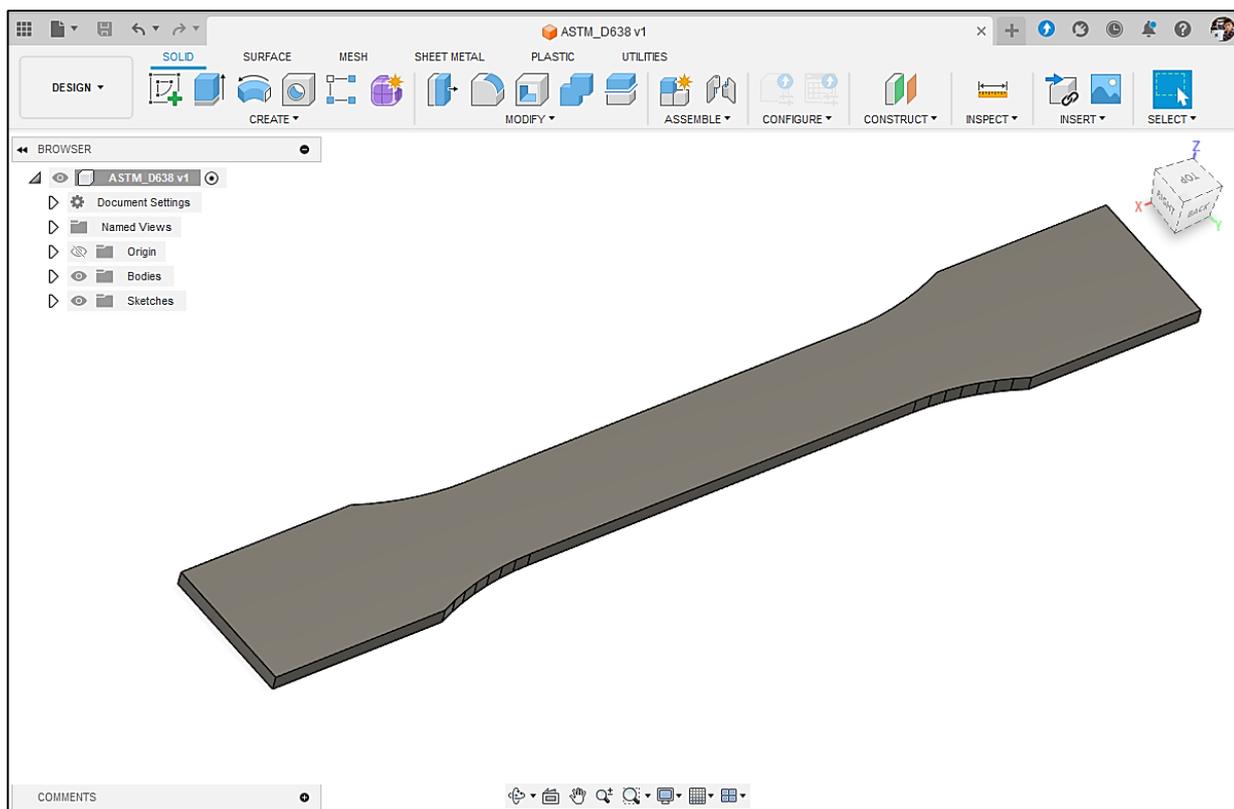


Рис. 3.4 – Autodesk Fusion – проектування лопатки для розривної машини

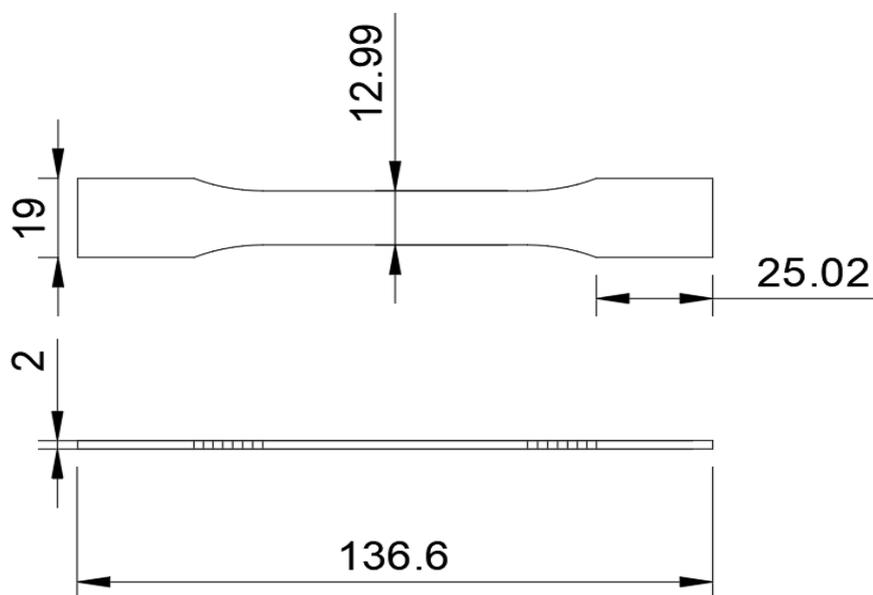


Рис. 3.5 – Визначення розмірів лопатки

Нижче наведені результати проектування лопатки в САД програмі Autodesk Fusion та експортування тривимірного об'єкта в форматі STL».

Vambu Studio є спеціалізованим програмним забезпеченням для підготовки та керування процесом 3D-друку, розробленим компанією Vambu Lab. Цей програмний комплекс інтегрує інструменти для слайсингу, управління 3D-принтерами та оптимізації параметрів друку, що робить його ключовим компонентом у сучасних адитивних технологіях. Він забезпечує високий рівень автоматизації та підтримує передові функції для покращення якості, швидкості та ефективності 3D-друку. Нижче на рисунку 3.6 наведено процес керування процесом 3D-друку з використанням.

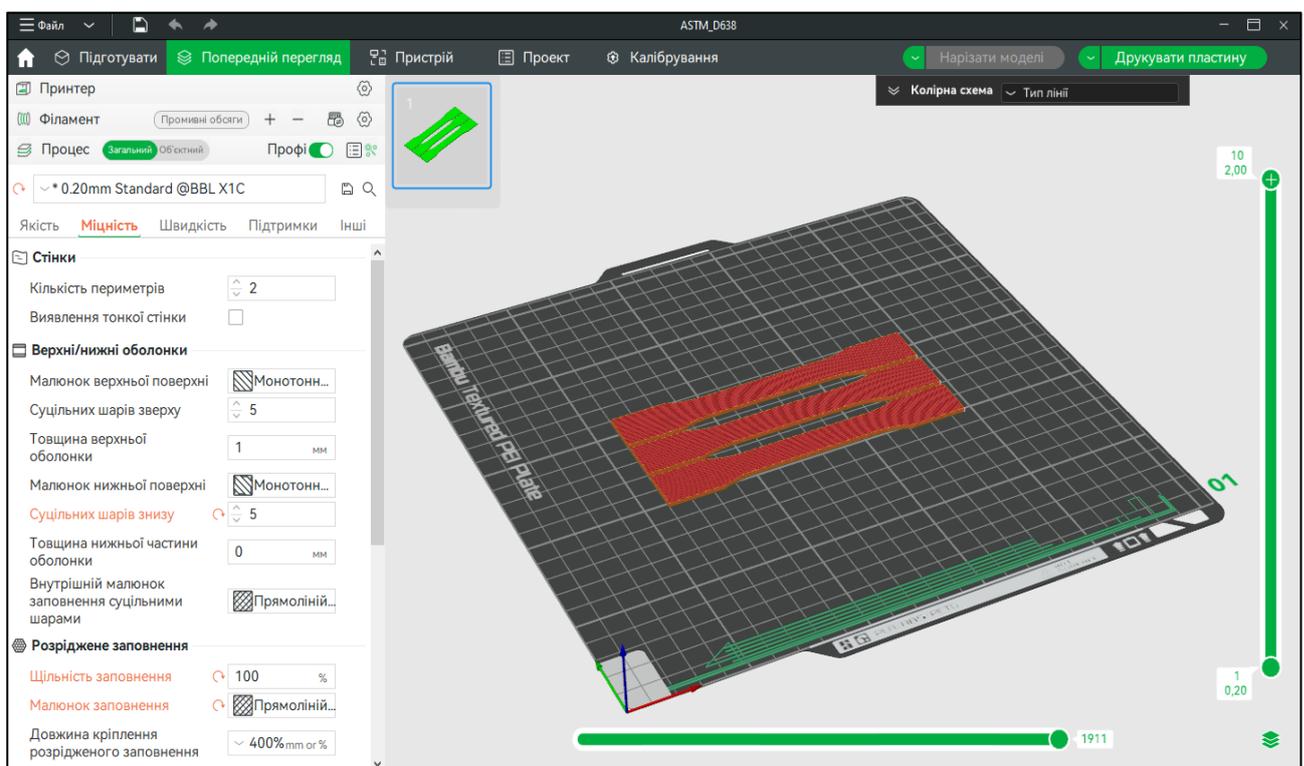


Рис. 3.6 – Vambu Studio – програмне забезпечення для нарізання (slicer) 3D-моделей

Vambu Studio надає розширений набір інструментів для точного налаштування параметрів 3D-друку, що дозволяє оптимізувати якість, швидкість та ефективність процесу (рис. 3.7). Програмне забезпечення інтегрує як базові, так і просунуті функції керування, забезпечуючи гнучкість у роботі з різними типами матеріалів, геометрії та технологій адитивного виробництва.

Основні параметри друку наведені нижче на рис. 3.7.

<p>Висота шару</p> <p>Висота шару <input type="text" value="0,2"/> мм</p> <p>Висота початкового шару <input type="text" value="0,2"/> мм</p> <p>Ширина лінії</p> <p>За замовчуванням <input type="text" value="0,42"/> мм</p> <p>Перший шар <input type="text" value="0,5"/> мм</p> <p>Зовнішні периметри <input type="text" value="0,42"/> мм</p> <p>Периметри <input type="text" value="0,45"/> мм</p> <p>Верхній шар <input type="text" value="0,42"/> мм</p> <p>Розріджене заповнення <input type="text" value="0,45"/> мм</p> <p>Внутрішнє суцільне заповнення <input type="text" value="0,42"/> мм</p> <p>Підтримки <input type="text" value="0,42"/> мм</p> <p>Шов</p> <p>Положення шва <input type="text" value="Вирівняний"/></p> <p>Smart scarf seam application <input checked="" type="checkbox"/></p> <p>Scarf application angle threshold <input type="text" value="155"/> °</p> <p>Шарф навколо всієї стіни <input type="checkbox"/></p> <p>Кроки шарфа <input type="text" value="10"/></p>	<p>Стінки</p> <p>Кількість периметрів <input type="text" value="2"/></p> <p>Виявлення тонкої стінки <input type="checkbox"/></p> <p>Верхні/нижні оболонки</p> <p>Малюнок верхньої поверхні <input type="text" value="Монотонн..."/></p> <p>Суцільних шарів зверху <input type="text" value="5"/></p> <p>Товщина верхньої оболонки <input type="text" value="1"/> мм</p> <p>Малюнок нижньої поверхні <input type="text" value="Монотонн..."/></p> <p>Суцільних шарів знизу <input type="text" value="5"/></p> <p>Товщина нижньої частини оболонки <input type="text" value="0"/> мм</p> <p>Внутрішній малюнок заповнення суцільними шарами <input type="text" value="Прямоліній..."/></p> <p>Розріджене заповнення</p> <p>Щільність заповнення <input type="text" value="100"/> %</p> <p>Малюнок заповнення <input type="text" value="Прямоліній..."/></p> <p>Довжина кріплення розрідженого заповнення <input type="text" value="400% mm or %"/></p> <p>Максимальна довжина якоря розрідженого заповнення <input type="text" value="20"/> мм or %</p>	<p>Швидкість першого шару</p> <p>Перший шар <input type="text" value="50"/> мм/с</p> <p>Початкове заповнення шару <input type="text" value="105"/> мм/с</p> <p>Швидкість інших шарів</p> <p>Зовнішні периметри <input type="text" value="200"/> мм/с</p> <p>Периметри <input type="text" value="300"/> мм/с</p> <p>Малі периметри <input type="text" value="50%"/> мм/с або %</p> <p>Поріг малого периметру <input type="text" value="0"/> мм</p> <p>Розріджене заповнення <input type="text" value="270"/> мм/с</p> <p>Внутрішнє суцільне заповнення <input type="text" value="250"/> мм/с</p> <p>Верхній шар <input type="text" value="200"/> мм/с</p> <p>Уповільнення звису <input checked="" type="checkbox"/></p> <p><input type="text" value="0"/> мм/с (10%, 25%)</p> <p><input type="text" value="50"/> мм/с (25%, 50%)</p> <p>Швидкість звисання <input type="text" value="30"/> мм/с (50%, 75%)</p> <p><input type="text" value="10"/> мм/с (75%, 100%)</p> <p>стіна понад 100% (не міст) <input type="text" value="50"/> мм/с</p>
---	--	--

Рис. 3.7 – Налаштування друку для лопаток

Програмний комплекс підтримує роботу з різними форматами цифрових моделей, включаючи: формати 3D-моделей (STL, OBJ), контейнерні формати (3MF) з підтримкою кольору та текстур, системи автоматичного виправлення помилок сітки (незамкнені грані, перетини поверхонь) тощо. Також дане програмне забезпечення має інструменти масштабування та орієнтації моделі на робочому полі, зокрема, слайсинг та генерація шарів, який передбачає автоматичне розбиття моделі на шари з регульованою товщиною (0,05-0,3 мм), генерацію опорних структур з адаптацією до геометрії моделі та оптимізацію траєкторій руху екструдера для мінімізації часу друку (рис. 3.8). Програма дозволяє оптимізувати процес 3D-друку за критеріями якості, швидкості та економії матеріалів, що робить її ефективним рішенням як для професійного використання, так і для аматорських проектів.

Дані здійснюємо підготовку моделі до друку в Bambu Studio – це підготовка тривимірної моделі до друку «Нарізання моделі на шари».

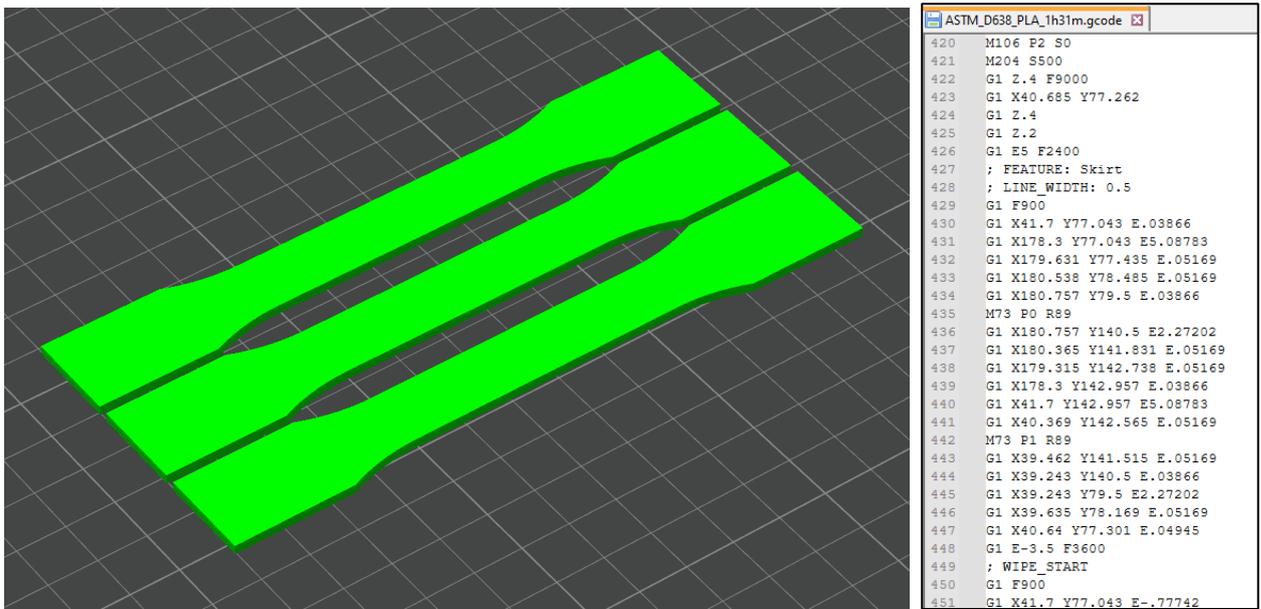


Рис. 3.8 – Bambu Studio – підготовка тривимірної моделі до друку (ліворуч процес друку, праворуч – виконуваний код)

G-Code (Geometric Code) у контексті Bambu Studio представляє собою мову керуючих команд для 3D-принтерів, яка генерується в результаті процесу слайсингу тривимірних моделей. Низькорівневий мовний інтерфейс містить інструкції для точного позиціонування екструдера, контролю температури та управління периферійними системами принтера.

3.3 Математичні моделі врахування фізичних властивостей полімерів для змішування

Модель оцінки сумісності двох полімерів. Параметр розчинності визначається за формулою [99]:

$$\Delta G_m = \Phi_1 \ln \Phi_1 + \Phi_2 \ln \Phi_2 + \chi \Phi_1 \Phi_2,$$

де

ΔG_m – зміна вільної енергії змішування;

Φ_1, Φ_2 – об'ємні частки полімерів у суміші;

χ – параметр взаємодії Флорі-Хаггінса.

Якщо $\Delta G_m < 0$, полімери сумісні. PLA: $\Phi_1 = 0,6$; ABS: $\Phi_2 = 0,4$. Параметр взаємодії $\chi = 0,5$. Отже, полімери є сумісними.

Модель в'язкості змішаних полімерів. В'язкість суміші полімерів визначається за правилом логарифмічної адитивності [99]:

$$\ln \eta = \Phi_1 \ln \eta_1 + \Phi_2 \ln \eta_2, \Rightarrow \boxed{\eta = \eta_2 \left(\frac{\eta_1}{\eta_2} \right)^{\Phi_1}},$$

де

η – ефективна в'язкість суміші,

η_1, η_2 – в'язкості індивідуальних полімерів.

Нижче визначимо в'язкість композитного матеріалу (суміш двох полімерів). Візьмемо два матеріали PLA та ABS. Їхні характеристики наступні: $\eta_1 = 1500$ Па·с – PLA при 210°C, $\eta_2 = 800$ Па·с – ABS при 250°C. Візьмемо їх в наступних об'ємних пропорціях: $\Phi_1 = 0,6$, $\Phi_2 = 0,4$. Тоді, в'язкість композиту обчислюється за виразом:

$$\begin{aligned} \ln \eta &= 0,6 \ln 1500 + 0,4 \ln 800; \\ \eta &= 1500^{0,6} \cdot 800^{0,4} \approx 1166,52 \text{ [Па} \cdot \text{с]}. \end{aligned}$$

Остаточно, маємо $\eta \approx 1166,52$ [Па·с].

$$\Phi_1 = 0,6; \Phi_2 = 0,4; \chi = 0,5;$$

$$\Phi_1 \ln \Phi_1 + \Phi_2 \ln \Phi_2 + \chi \cdot \Phi_1 \Phi_2 \approx -0,5530.$$

Математична модель визначення мінімальної вартості суміші полімерів при механічних обмеженнях. Знайти мінімальну вартість

$$\sum_{i=1}^n C_i \Phi_i \rightarrow \min,$$

Якщо

$$\sum_{i=1}^n \sigma_i \Phi_i \geq \sigma_{min}, \quad \sum_{i=1}^n E_i \Phi_i \geq E_{min},$$

$$\sum_{i=1}^n \Phi_i = 1; \quad 0 \leq \Phi_i \leq 1,$$

де

C_i – вартість полімеру i ,

σ_i – міцність полімеру i ,

E_i – модуль Юнга полімеру i ,

σ_{min}, E_{min} – допустимі характеристики.

$$20\Phi_1 + 15\Phi_2 \rightarrow \min,$$

$$\begin{cases} 60\Phi_1 + 40\Phi_2 \geq 50 \\ 3500\Phi_1 + 2200\Phi_2 \geq 2800, \\ \Phi_1 + \Phi_2 = 1, \\ 0 \leq \Phi_1 \leq 1, \quad 0 \leq \Phi_2 \leq 1 \end{cases}$$

На рис. 3.9 показано результати пошуку параметрів моделі.

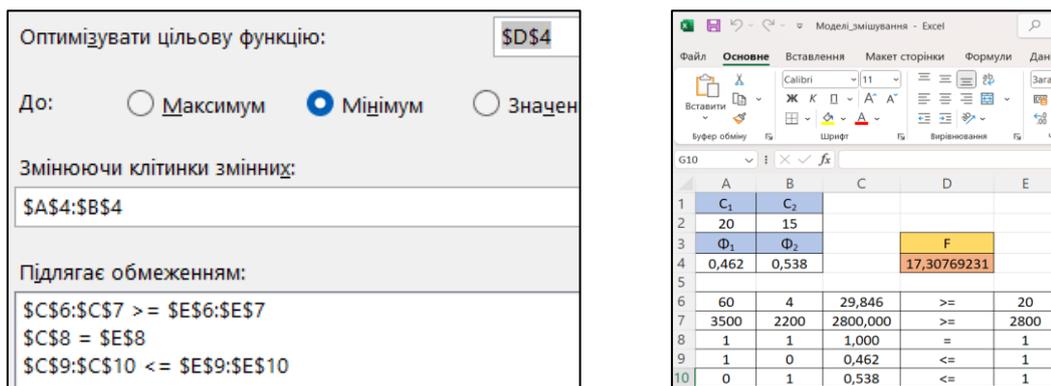


Рис. 3.9 – Результати розрахунку оптимальних параметрів моделі з використанням MS Excel

Отже, оптимальна вартість нового матеріалу буде, якщо взяти PLA і ABS в об'ємних частках: $\Phi_1 = 0,462$, а $\Phi_2 = 0,538$.

3.4 Хід 3D-друку спроектованих дослідних зразків

Процеси 3D-друку добре налагоджені для виробництва об'єктів, що складаються з полімерів і полімерних композитів. Деякі техніки 3D-друку добре відпрацьовані – це екструзія матеріалу (ЕМ), струмінь матеріалу (СМ), струмінь біндера (СБ), але багато інших все ще перебувають на стадії розробки [1].

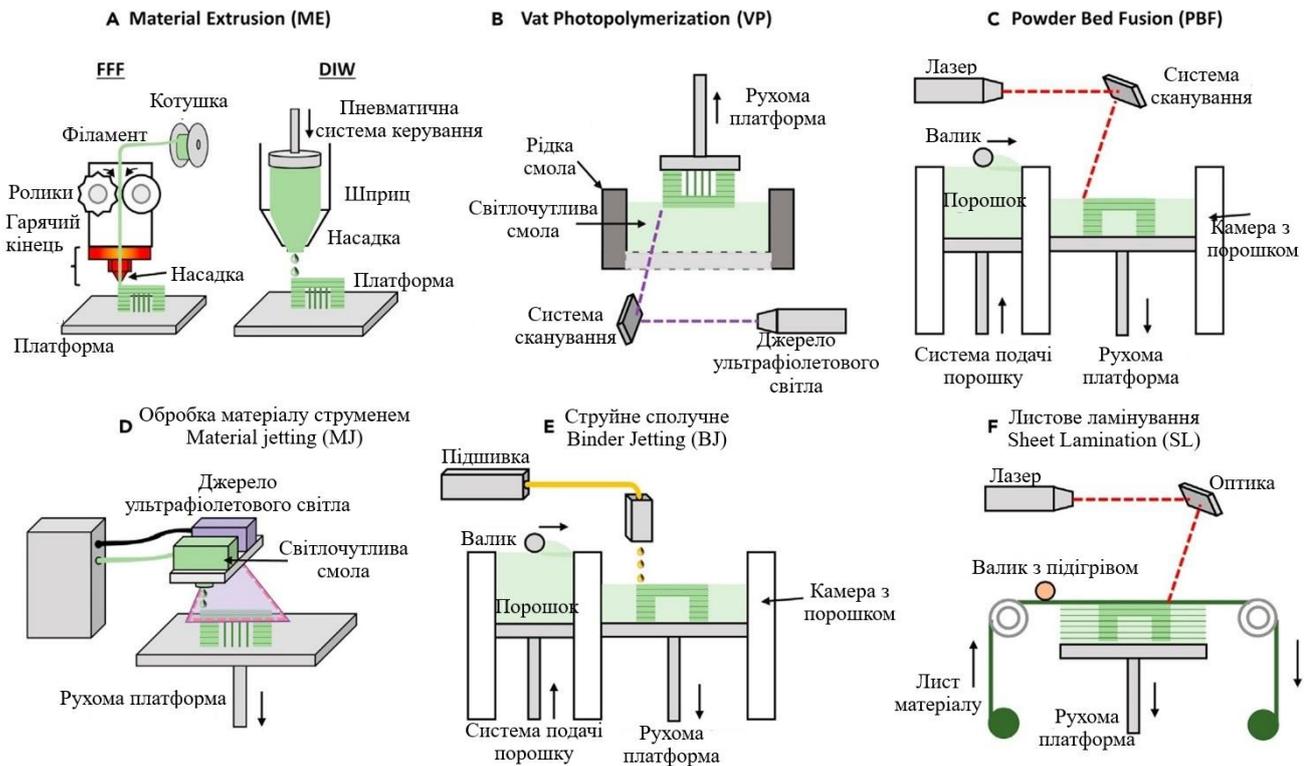


Рис. 3.10 – Схеми реалізації різних технік 3D-друку [101; 103–105]

На рис. 3.10 зображено: а) – у екструзії матеріалів, виробництво нитки плавленням – це метод 3D-друку, при якому тверда нитка розплавляється, екструдується через сопло та наноситься шар за шаром. Для прямого чорнильного письма використовується в'язкоеластичне чорнило, а чорнило екструдується через невелике сопло під контрольованою швидкістю потоку; б) – фотополімеризація використовує ультрафіолетове світло для затвердіння фотополімерної смоли в рідкій ванні шляхом формування зшитих мереж; с) – злиття порошкового шару використовує теплову енергію для плавлення порошкоподібного матеріалу та друку 3D-об'єкту; д) – технологія струминного друку матеріалу друкує 3D-вироби шляхом вибіркового осадження крапель

будівельних матеріалів; e) – струмінь біндера (СБ) скидає рідке сполучне на порошкові матеріали, які є основними компонентами кінцевих об'єктів; f) – листове ламінування (ЛЛ) використовує тонкі листи матеріалу та скріплює їх шар за шаром для виготовлення 3D-об'єкта [1; 3].

Кожен процес 3D-друку має свої переваги та проблеми при виготовленні полімерних композитів і вимагає специфічних умов полімеру, таких як форма, стан (твердий або рідкий) і фізичних властивостей (в'язкості і температури плавлення). Тому, вибираючи методи 3D-друку, користувач повинен враховувати матеріали, вартість і вимоги до застосування (включаючи роздільну здатність, складність геометрії та механічні властивості). Розглянемо механізм 3D-друку [1; 4; 5].

Для успішного друку продукції важливо контролювати швидкість подачі, яка виштовхує розплавлену нитку з сопла, і підтримувати тиск стиснення між роликком і гарячим кінцем нижче критичної межі, щоб запобігти викривленню нитки. Вигин є одним з найпоширеніших режимів відмови при екструзії нитки. У 2000 р. експериментально була знайдена залежність між викривленням і співвідношенням модуля пружності нитки і в'язкості розплаву. Якщо відношення модуля дії вихідної сировини і в'язкості її розплаву перевищує критичну межу, викривлення не відбудеться. На механічні властивості друкованих об'єктів впливають швидкість друку, температура та умови навколишнього середовища (температура та вологість). Створювана напруга зсуву в розплавленому стані полімеру залежить від швидкості друку і впливає на ступінь орієнтації полімерних ланцюгів. У результаті полімерні ланцюги мають тенденцію до вирівнювання вздовж напрямку друку, а міцність полімеру вздовж напрямку ланцюга вища, ніж у поперечному напрямку. Також слід враховувати температуру навколишнього середовища платформи для 3D-друку, оскільки температура впливає на швидкість охолодження розплавленого полімеру та подальшу кристалічність повторно затверділого полімеру, тим самим впливаючи на кінцеві механічні характеристики друкованого об'єкта.

Вартість настільних 3D-принтерів варіюється приблизно від 300 доларів США за просте використання та до 2000–8000 доларів США за професійне використання. Загалом цей тип машин може оперативнo виготовити 3D-об'єкт зі швидкістю від 50 і 150 мм/год до 500 мм/год. Що стосується розмірів збірки, то вони обмежуються габаритами друкарської форми і розміром камери. FDM-принтери (Frequency-Division Multiplexing – FDM) для побутових цілей можуть друкувати 3D-продукцію розмірами до 3200 мм. Для промислових цілей FDM може бути використаний для виготовлення великих об'єктів розмірами 1000 мм. Однак він має низьку роздільну здатність порівняно з іншими методами друку через розмір сопла (зазвичай близько 0,4 мм у діаметрі).

Основна проблема полягає в тому, що друкowana продукція часто має низьку міцність і в'язкість у напрямку побудови (вісь Z) через слабе міжшарове склеювання та утворення пустот [3; 5]. Існує кілька підходів для полегшення слабого зчеплення та утворення пустот між шарами шляхом посилення мережі поперечних зв'язків між прошарками. Одним із методів є використання оптичної системи нагрівання, такої як лазерна або інфрачервона лампа, для нагрівання попередньо наплавленої поверхні перед осадженням матеріалу, що може посилити дифузію полімерного ланцюга на межі між шарами. Наприклад, інфрачервоне випромінювання використовувалося для попереднього нагрівання поверхні друкowanej області безпосередньо перед нанесенням наступного шару. Інфрачервоне випромінювання показало ефективне нагрівання в широкій області вище температури плавлення скла, де відбувається міжмолекулярна дифузія по всій поверхні, що робить його придатним для систем адитивного виробництва великої площі. Іншим способом є модифікація нитки шляхом додавання теплопровідних наповнювачів до полімерів, щоб допомогти виробленню тепла між прошарками. Нитки, покриті вуглецевими нанотрубками (ВНТ), були розроблені для зварювання друкovaných інтерфейсів за допомогою мікрохвильового опромінення. Компанія Markforged розробила перший комерційний принтер, здатний працювати з полімерним композитом АВ. Цей принтер має подвійні сопла для полімерної та армованої волокном нитки, що

працюють індивідуально. Він стискає надруковані волокна, армовані волокном, і деформує їх з круглої форми до прямокутної для створення кращого міжшарового з'єднання. Пошаровий вигляд є ще однією проблемою, особливо у FDM, оскільки він має нижчу роздільну здатність порівняно з іншими методами 3D-друку, такими як стереолітографія. Зовнішній вигляд друківаної продукції може бути важливим, якщо в застосуванні (наприклад, будівлі, іграшки та аерокосмічна промисловість) віддається перевага плоскій поверхні. Тому для гладкої поверхні знадобляться хімічні або фізичні методи подальшої обробки, такі як плавлення, лиття смолою, обробка ацетоном, дробоструминна обробка, традиційна обробка та шліфування.

Слід зазначити, що композитні вироби можуть бути виготовлені з використанням композитних ниток, які є сумішшю арматури та полімерної матриці. Однак сопло 3D-принтера може легко забиватися через більш високу в'язкість у розплавленому стані, більший розмір або агломерацію арматури, а також відсутність екструзійних сил для виштовхування твердих ниток із сопла [2; 4]. У такому випадку, кількість дефектів при використанні композитних матеріалів зростає, а це означає, що необхідно покращувати сучасні техніки контролю якості 3D-друку.

3.5 Обладнання для випробування дослідних зразків

Серія Shimadzu Autograph AGS-X забезпечує чудову продуктивність і практичність тестування рішень для широкого спектру застосувань. Пропонуючи контроль на високому рівні та інтуїтивно зрозуміле керування, серія AGS-X встановлює новий стандарт для оцінки міцності для забезпечення максимального дотримання безпеки.

У стандартну комплектацію AGS-X входить провідне у галузі TRAPEZIUM програмне забезпечення. На рис. 3.11 показано серію розривних машин, на яких поводять даного роду дослідження.



10 кН

20 кН

30 кН

Рис. 3.11 – Розривні машини для дослідження і тестування зразків, які виготовлені з полімерних матеріалів

3.6 Результати експериментальних досліджень

Рисунок 3.12 містить фото, яке містить закріплення зразка у вигляді лопатки для дослідження фізико-технічних і механічних характеристик на відповідній розривній машині (Додаток Г).



Рис. 3.12 – Приклад кріплення зразка на розривній машині

Прикріплення зразка на розривній машині здійснюється за допомогою спеціалізованих затискачів, які забезпечують надійне фіксування випробовуваного матеріалу під час тесту на розрив. Зазвичай, зразок поміщається між двома чіпцями або губками, що мають регульовану відстань для точного встановлення відповідно до розмірів зразка. Після фіксації зразка система автоматично ініціює процес розтягування, при цьому машина контролює величину прикладеної сили та ступінь деформації зразка до його руйнування. Для точного вимірювання параметрів використовуються датчики деформації, а також програмне забезпечення для запису та аналізу результатів випробувань.

Цей процес дозволяє точно визначити характеристики матеріалу, такі як межа міцності на розрив, відносне подовження та інші механічні властивості, що є важливими для оцінки якості матеріалів у різних галузях. Нижче на рисунках 3.13–3.23 показано результати розриву розроблених зразків.

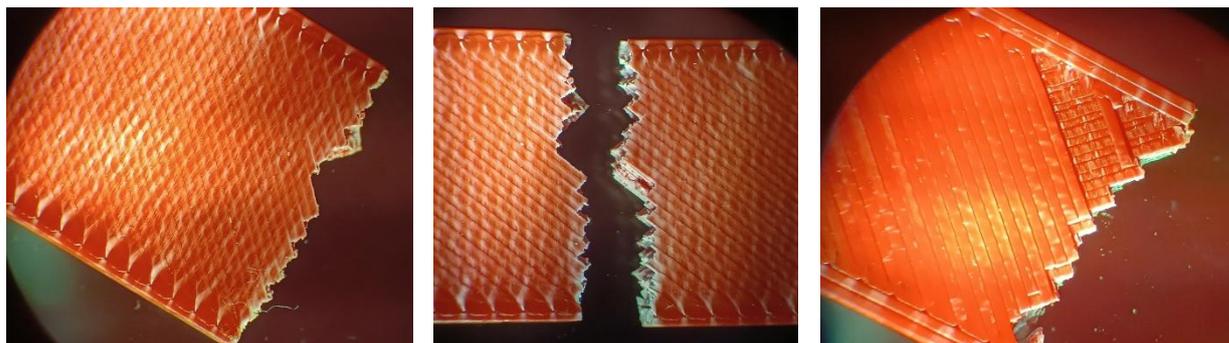


Рис. 3.13 – Результат розриву ABS-зразків

На зображеннях на рис. 3.13 видно результати розриву лопаток, виготовлених з ABS-пластику в умовах випробувань на розтяг. На першому зображенні видно ламкий злам із чіткою структурою волокон, поверхня зламу має виражену текстуру, яка вказує на те, що розрив відбувався вздовж шарів друку. Розрив носить крихкий характер, без значних деформацій, що притаманно ABS при низькій адгезії між шарами. На другому зображенні лопатка розірвана навпіл, з добре помітною «зубчастою» лінією розриву. Спостерігається ламкий характер руйнування з деяким проявом міжшарового розшарування. Це свідчить про відносно слабкий зв'язок між шарами або дефекти у структурі друку (наприклад, недостатня температура екструзії або погана адгезія). На третьому зображенні

характерна ламінарна структура зламу з розшаруванням по лініях укладання нитки. Руйнування чітко слідує лініям друку, що вказує на анізотропні властивості матеріалу, типові для FDM-друку з ABS. Можна припустити, що навантаження призвело до розшарування, а не до пластичної деформації.

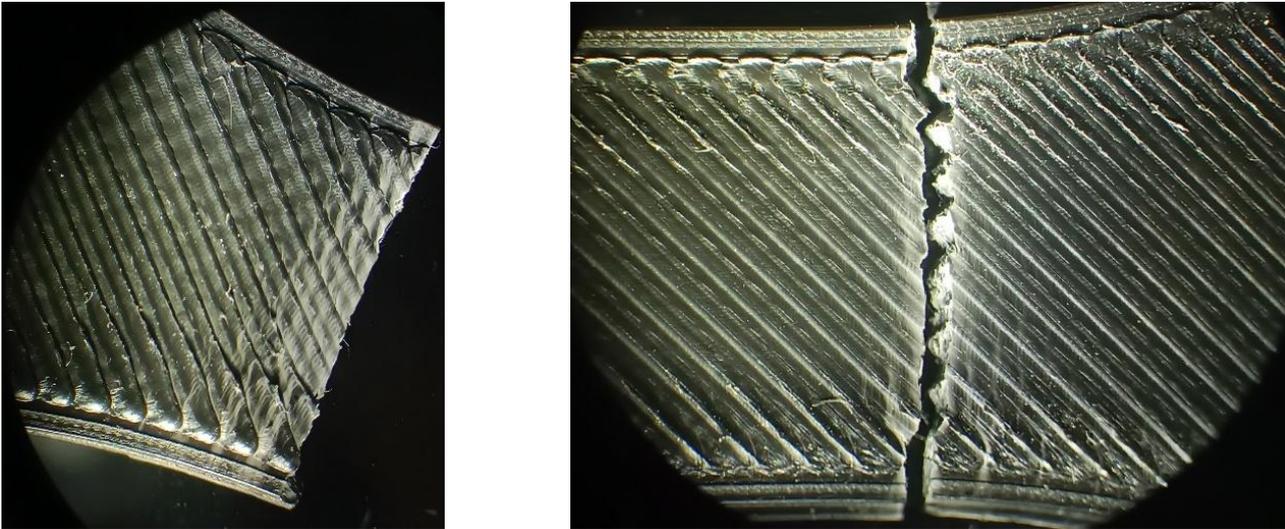


Рис. 3.14 – Результат розриву зразків ABS+

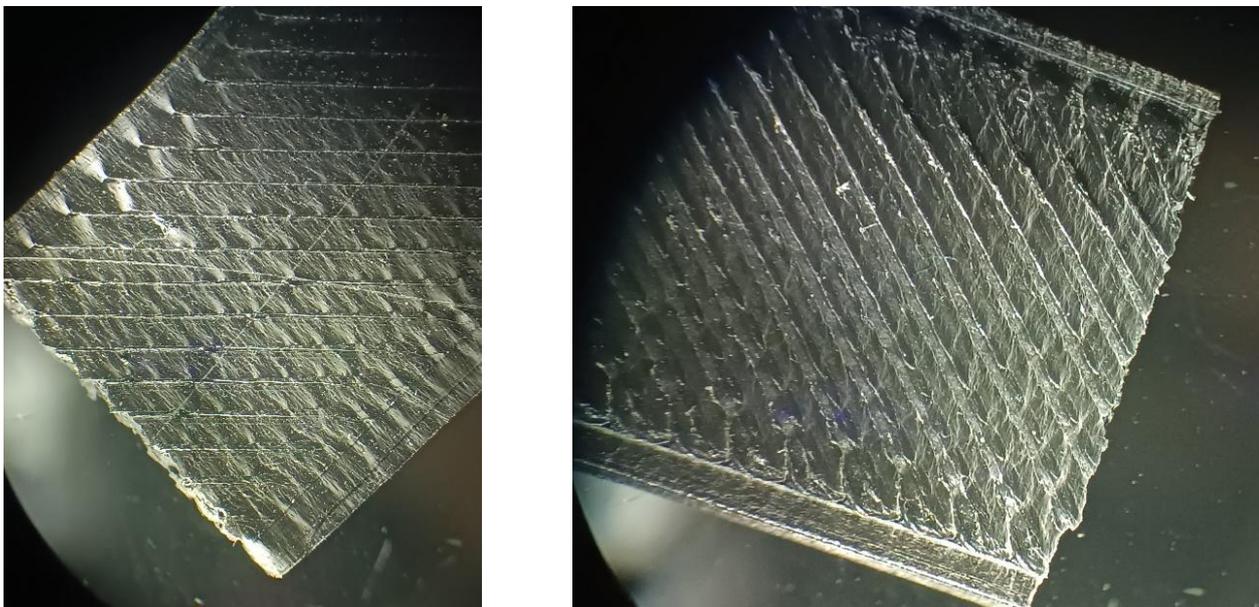


Рис. 3.15 – Результат розриву зразків ABS CF10

На рисунках 3.14–3.15 отримано схожі результати, зразки виготовлені з ABS CF10.

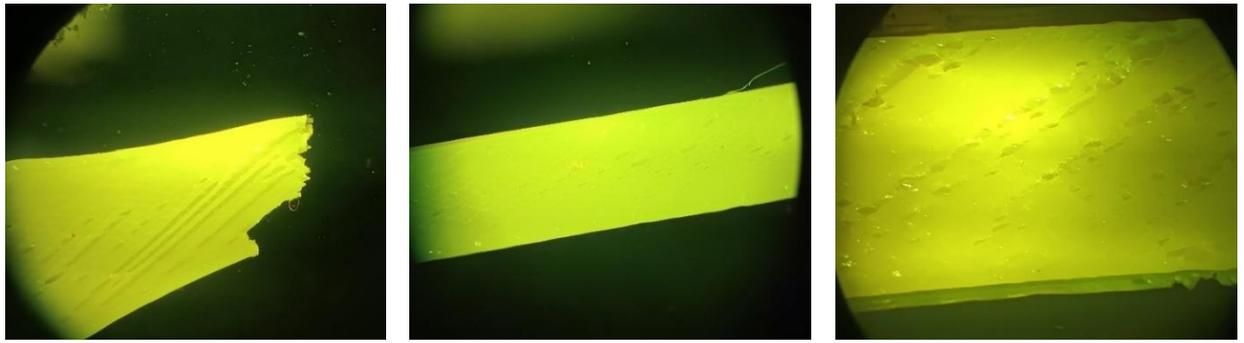


Рис. 3.16 – Результат розриву зразків FLEX 90

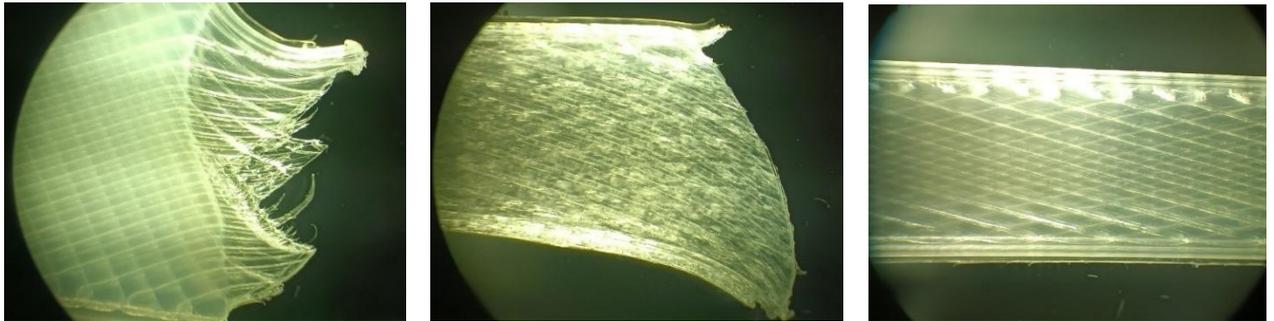


Рис. 3.17 – Результат розриву зразків NYLON (PA6)

На рисунку 3.17 перше зображення має поступовий розрив по волокнам. На рисунку прослідковується чітка текстура шарів друку з добре з'єднаними нитками. Розрив пройшов по площині шарів, але волокна залишились цілісними на значній частині поверхні. Добре міжшарове зчеплення. Розрив не є крихким – структура тягнеться, що типово для нейлону при гарному друці. Друге зображення має відрив з розшаруванням. Видно окремі нитки заповнення, що вийшли з поверхні – нитки не тримаються одна за одну. Розрив має ознаки розшарування. Видно також слабке міжшарове зчеплення. Вірогідна причина – недостатня температура екструдера або охолодження, або вологий нейлон.

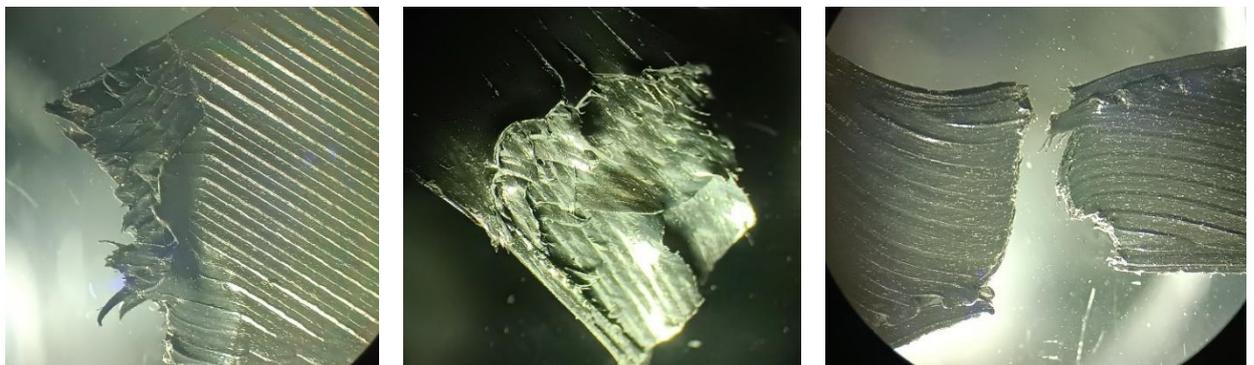


Рис. 3.18 – Результат розриву зразків NYLON CF10

На рисунку 3.18 отримано схожі результати, зразки виготовлені з ABS
NYLON CF10.

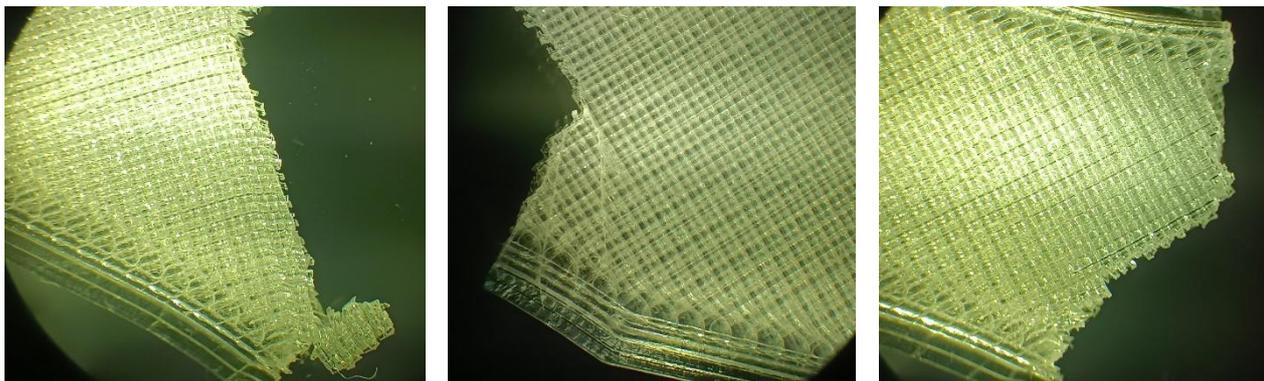


Рис. 3.19 – Результат розриву зразків PCTG

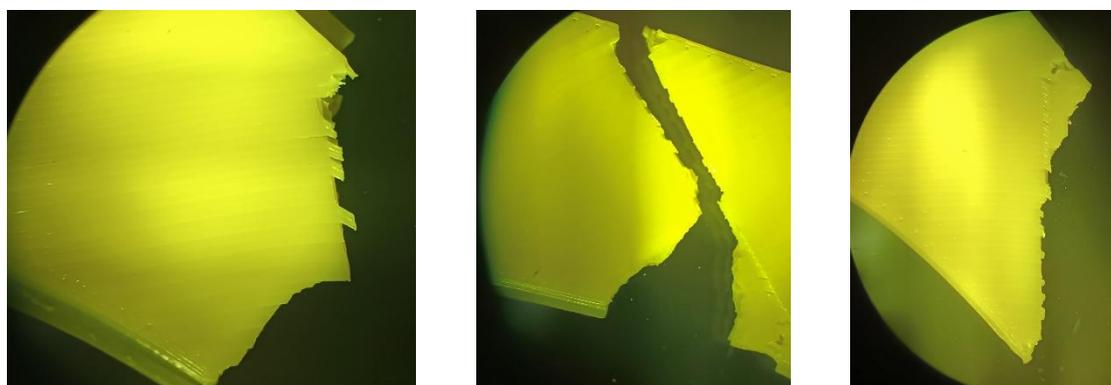


Рис. 3.20 – Результат розриву зразків PCTG CF10

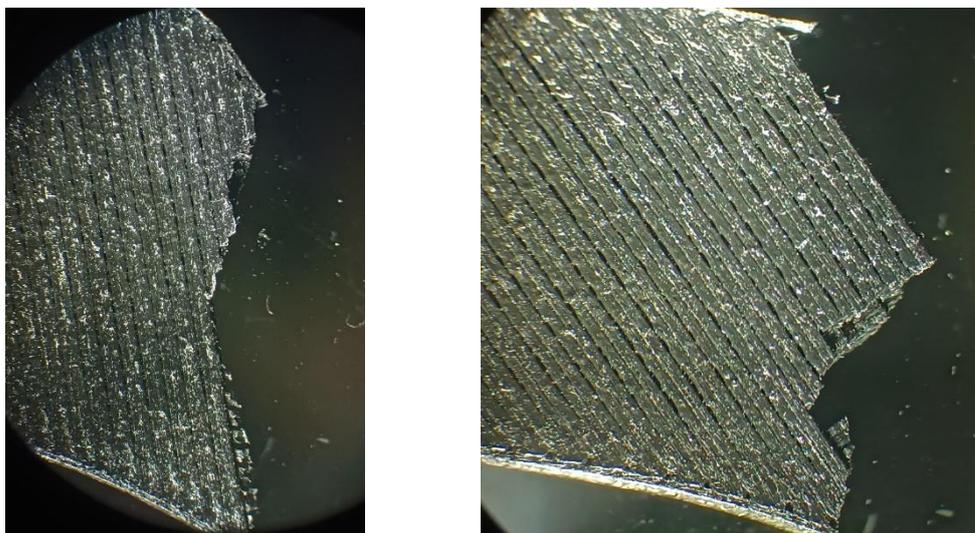


Рис. 3.21 – Результат розриву зразків PLA

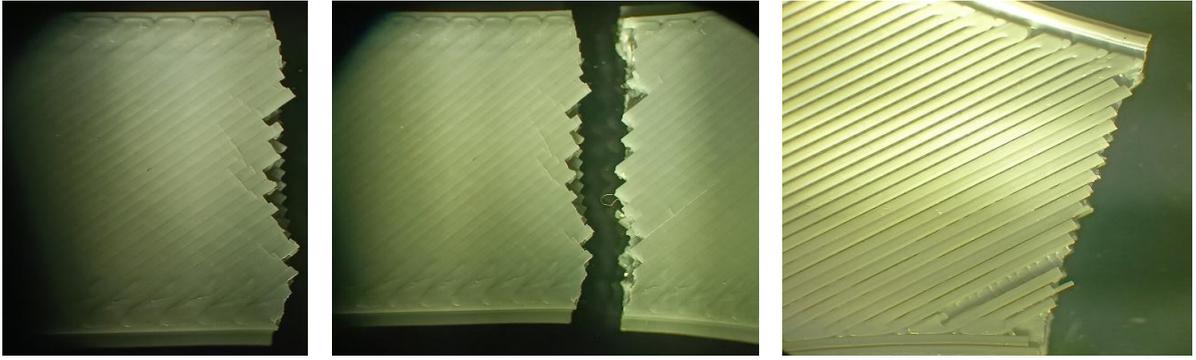


Рис. 3.22 – Результат розриву зразків PLA

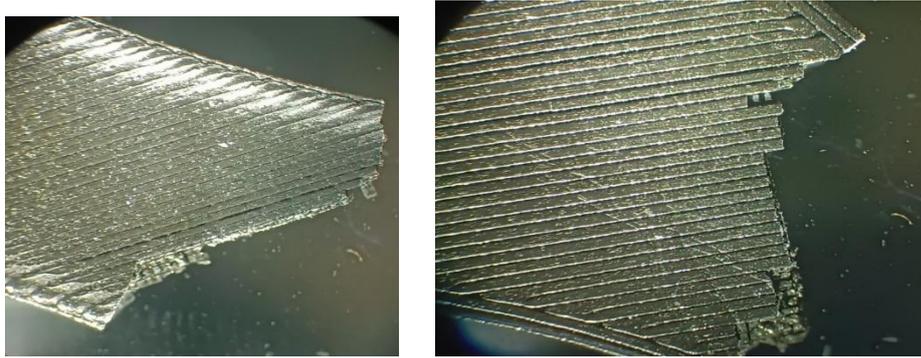


Рис. 3.23 – Результат розриву зразків PLA CF10

Нижче на рисунках 3.24–3.34 показано результати експериментальних досліджень фізико-технічних і механічних властивостей різних матеріалів на конкретних зразках, які були виготовлені з використанням сучасних адитивних технологій.

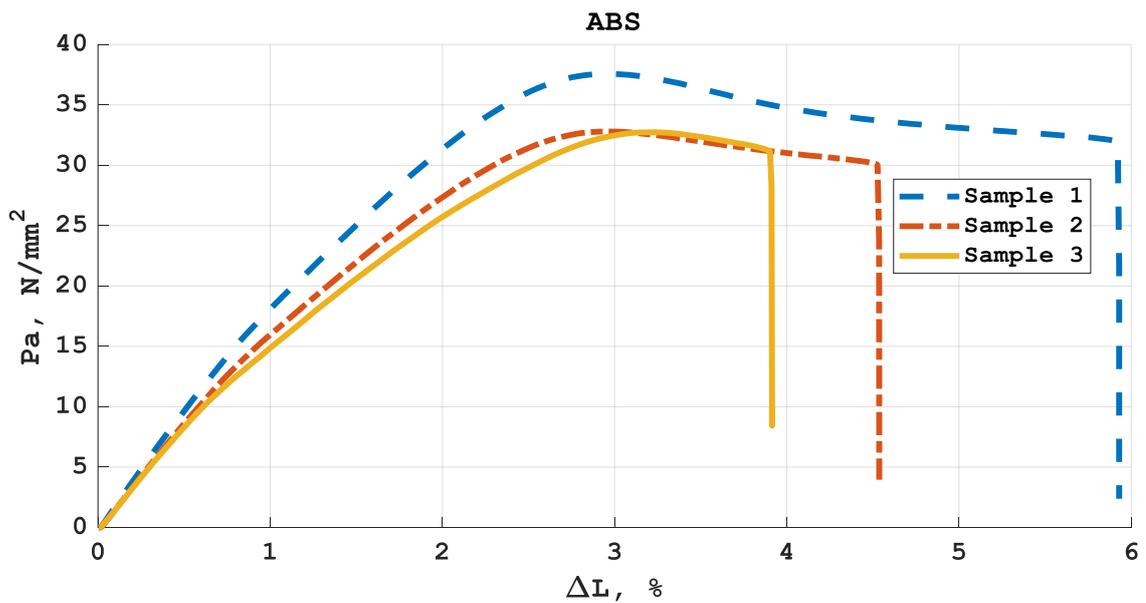


Рис. 3.24 – Результат видовження трьох зразків, які виготовлені з ABS

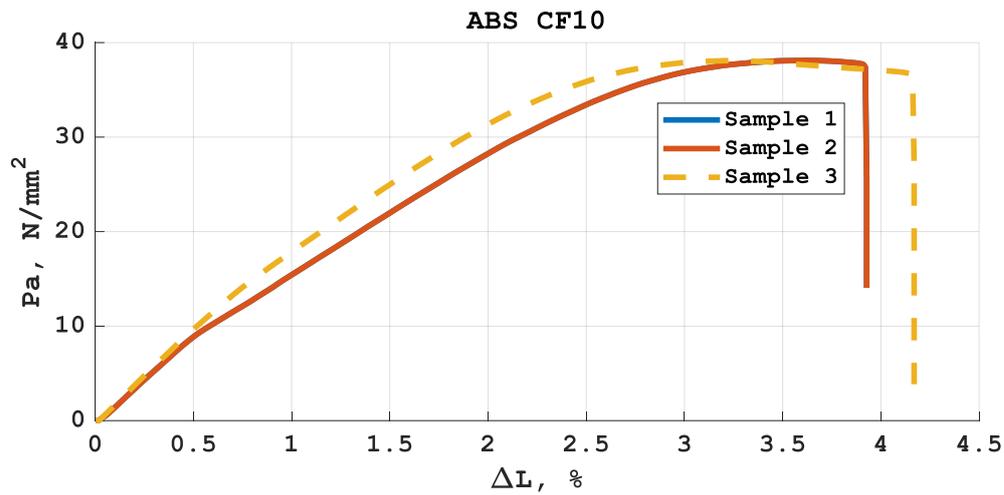


Рис. 3.25 – Результат видовження трьох зразків, які виготовлені з ABS CF10

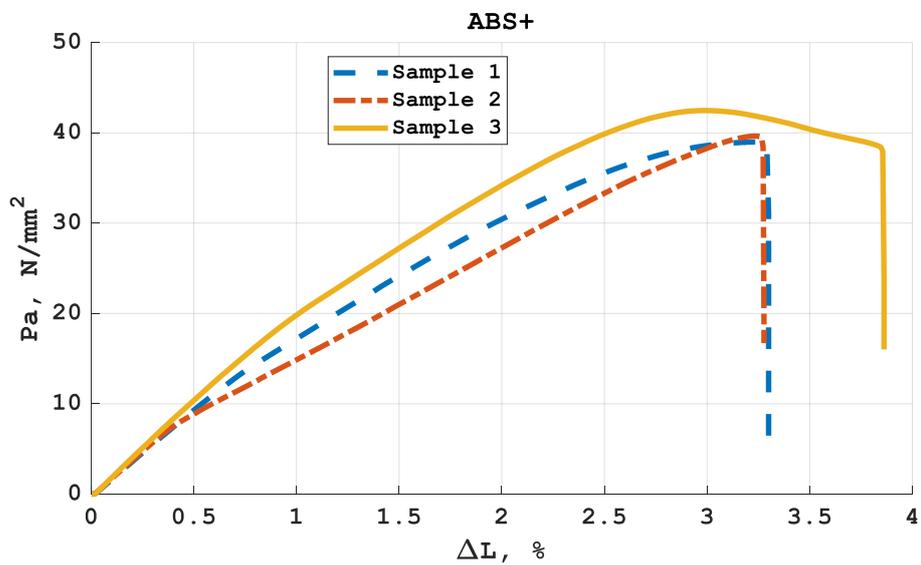


Рис. 3.26 – Результат видовження трьох зразків, які виготовлені з ABS+

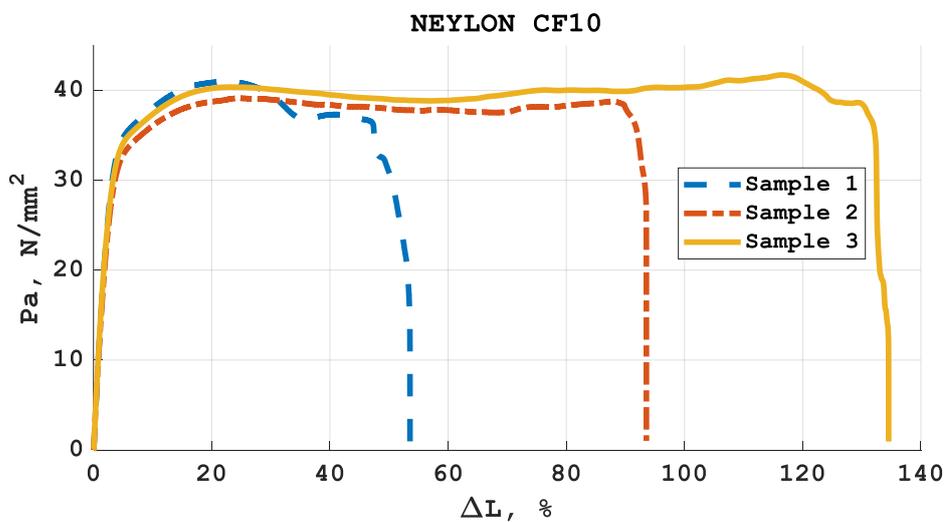


Рис. 3.27 – Результат видовження трьох зразків, які виготовлені з Nylon CF10

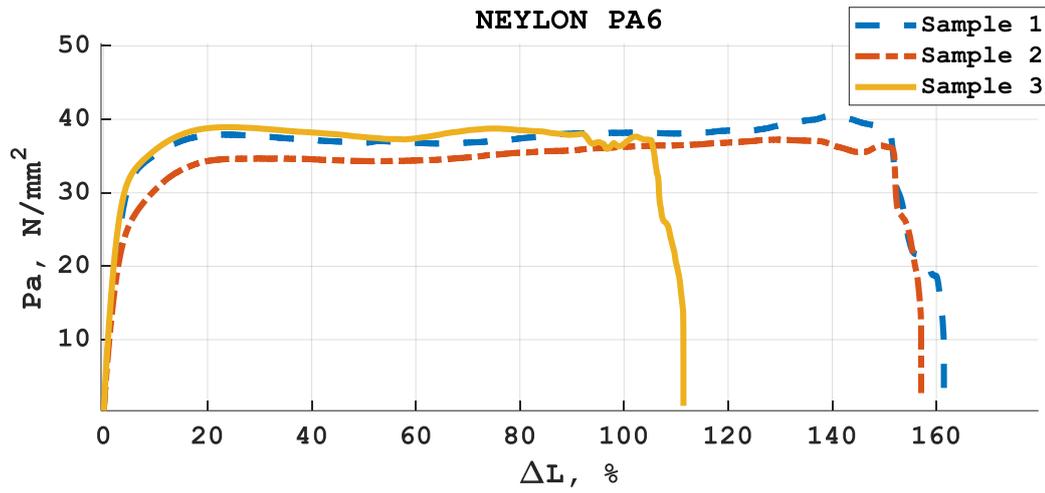


Рис. 3.28 – Результат видовження трьох зразків, які виготовлені з Nylon PA6

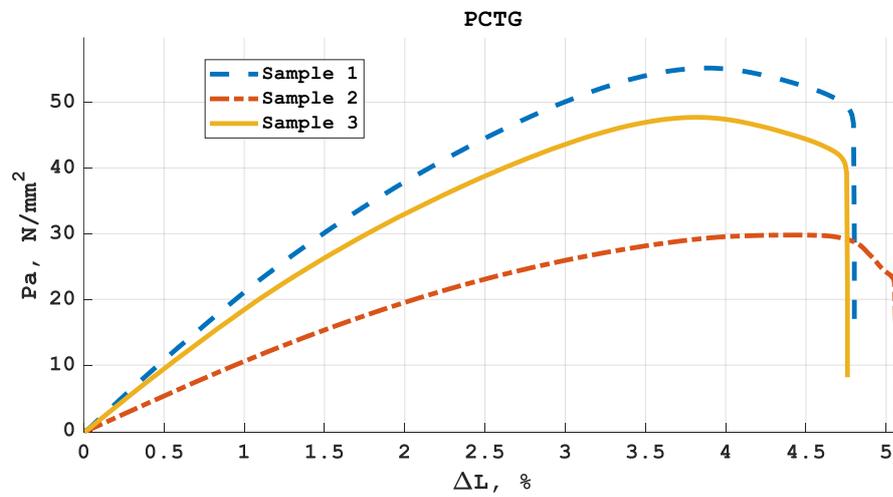


Рис. 3.29 – Результат видовження трьох зразків, які виготовлені з PCTG

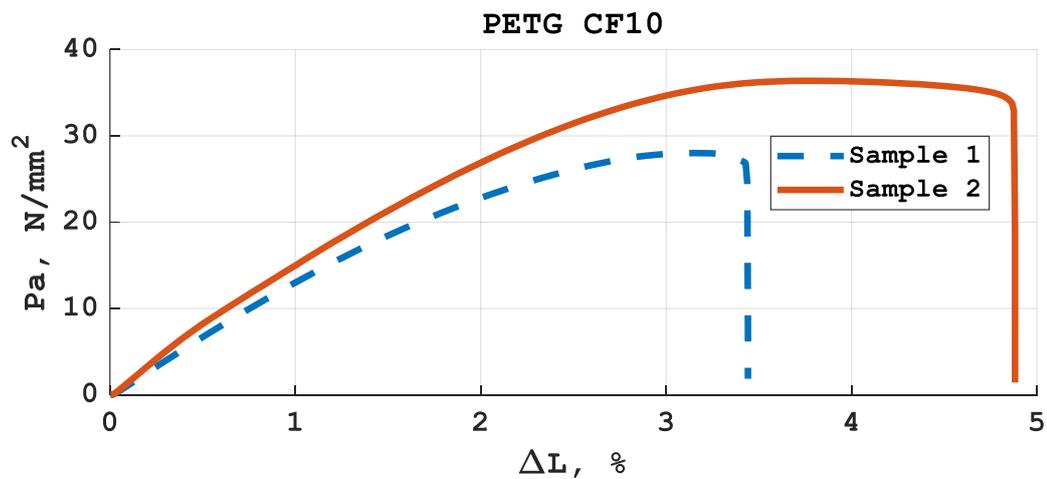


Рис. 3.30 – Результат видовження перших двох зразків, які виготовлені з PETG CF10

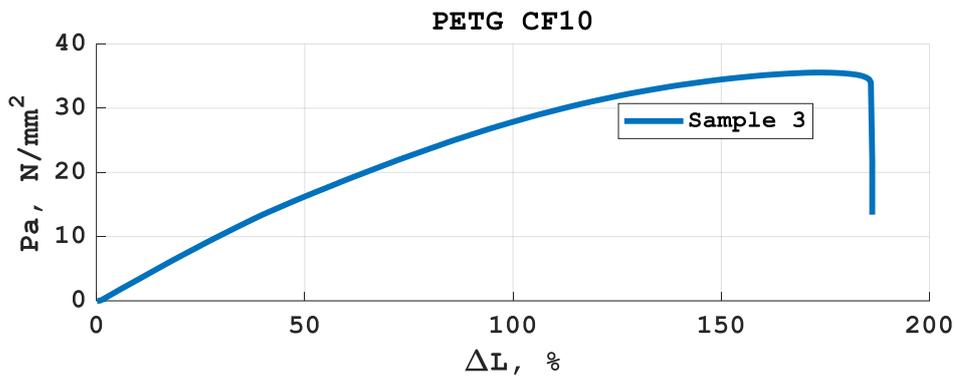


Рис. 3.31 – Результат видовження третього зразка, який виготовлений з PETG CF10

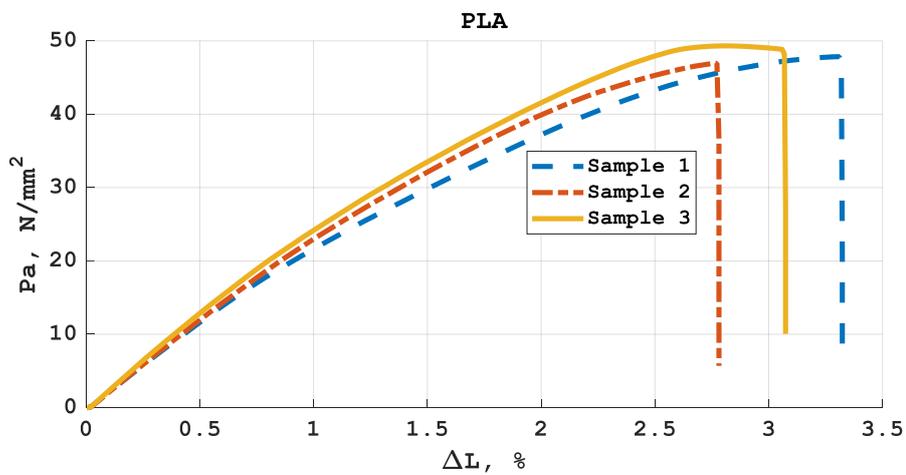


Рис. 3.32 – Результат видовження трьох зразків, які виготовлені з PLA

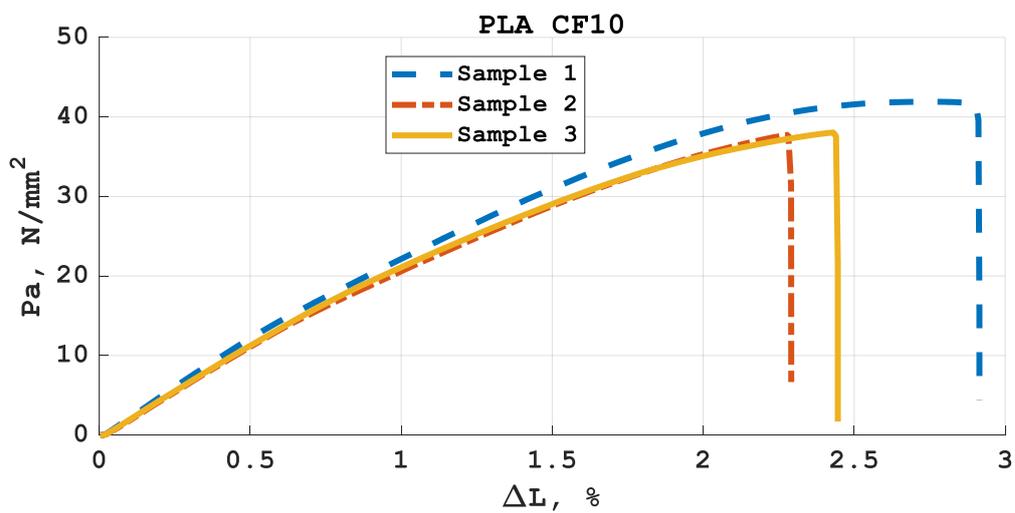


Рис. 3.33 – Результат видовження трьох зразків, які виготовлені з PLA CF10

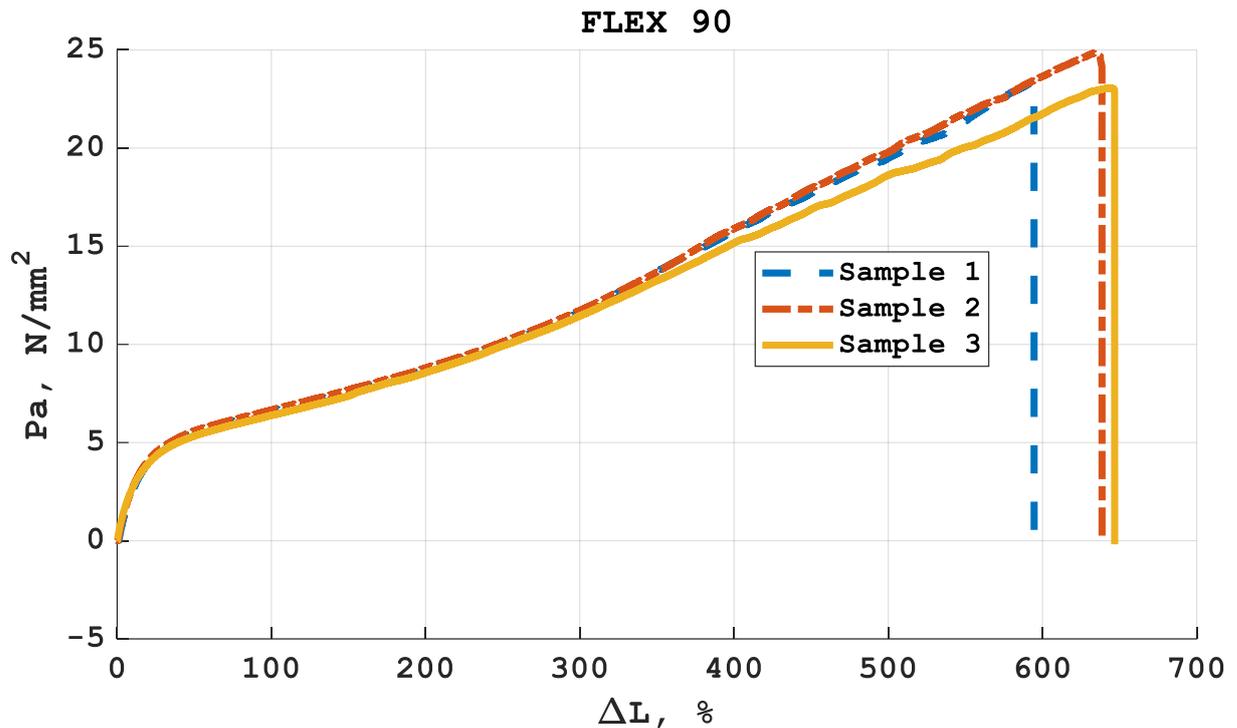


Рис. 3.34 – Результат видовження трьох зразків, які виготовлені з FLEX 90

Як бачимо з результатів проведення експериментів, зразки, які виготовлені з матеріалу Flex, мають найбільше видовження. Це свідчить про якість матеріалу загалом, а також про його ефективність виготовлення зразків саме з даного матеріалу. По результатах видно, що найкращі пластичні властивості є в матеріалі FLEX 90.

3.7 Експериментальні дослідження радіопрозорості матеріалів для 3D-друку елементів БпЛА

В ході реалізації запланованих завдань цієї роботи виникла необхідність у проведенні додаткових досліджень характеристик радіопрозорості матеріалів для 3D-друку. Погіршення радіопрозорості може привести до втрат енергії сигналів надвисоких частот (НВЧ) в каналах передачі даних за рахунок її поглинання конструктивними елементами, до зміни резонансних частот внаслідок поглинання матеріалом вологі тощо. В цілому це може бути причиною некоректної роботи радіотехнічного обладнання БпЛА в діапазоні НВЧ.

Випробування щодо контролю характеристик радіопрозорості проводились за допомогою опосередкованих вимірювань шляхом визначення температури

досліджуваних об'єктів після їх нагріву у електромагнітному полі НВЧ. Конструктивні пластикові елементи антени, вміщені у мікрохвильову піч, помітно нагріваються, що свідчить про поглинання ними енергії хвиль. Можливо, саме це і є причиною погіршення параметрів антени.

Був проведений експеримент з пластиками PLA, PETG, TPU. Три однакові кубики разом були поміщені в мікрохвильову піч, і після їх опромінення сфотографовано їх зображення на промисловому тепловізорі, що призначений для пошуків витоків тепла з будівель (рисунок 3.35 – рисунок 3.38).

Пластик TPU (м'який пластик на зразок гуми) гріється надзвичайно сильно, тому зразок з цього матеріалу відразу був вилучений з подальших порівнянь.

На рисунку 3.37 показана порівняльна термограма для кубика з TPU, що нагрівся до 45°C , і для двох інших кубиків, які практично не встигли нагрітися. Рисунок 3.36 ілюструє термограму прогрівання двох кубиків з різних матеріалів. Видно, що кубик з PLA гріється менше.

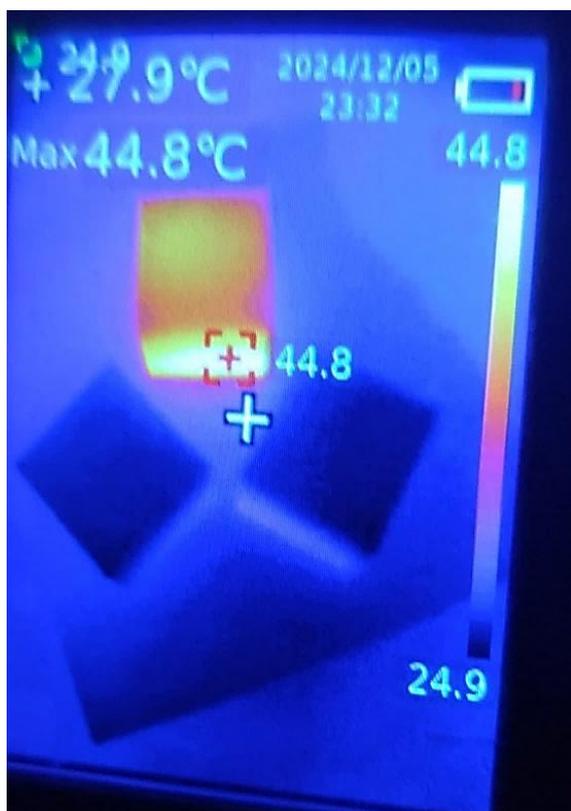


Рис. 3.35 – Термограма прогрівання кубик з TPU до 45°C і двох інших кубиків для порівняння

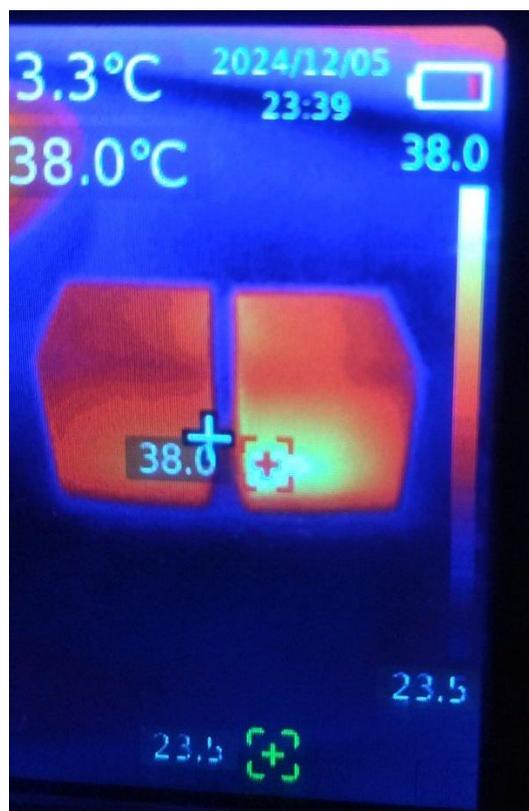


Рис. 3.36 – Термограма для двох інших кубиків (ліворуч кубик з PETG, праворуч – з PLA)

Час роботи мікрохвильової печі – менше 1 хвилини. На фото видно, що кубик з TPU нагрівся до 45°C, в той час як інші 2 кубики практично не встигли нагрітися. Антена не має елементів з цього матеріалу. Порівнюємо PETG та PLA, час нагрівання у печі: 3–4 хвилини.

На рисунку 3.37 показана термограма прогрівання 3 кубиків PLA у верхній частині, які надруковані у різний час з різних партій PLA. Внизу на фото зображено кубик з PETG.

На рисунку 3.38 показана термограма прогрівання кубика з PETG (вгорі) та кубика з PLA (внизу). Праворуч – надрукована деталь з PETG (тримач для передавача).



Рис. 3.37 – Термограма прогрівання 3-х кубиків, виготовлених з PLA та одного кубика з PETG



Рис. 3.38 – Термограма прогрівання кубика з PETG і кубика з PLA

З рисунка 3.34 видно, що PLA гріється менше, а з рисунка 3.37 – видно сильно нагріту область, хоча вся деталь загалом холодна.

На основі проведених експериментів слід зазначити, що втрати у пластику PLA менші, ніж у PETG, (в усякому разі, якщо не сильно нагрівати досліджувані зразки). Наші деталі в основному виробляються з PETG. Наявність електростатичної провідності матеріалу одночасно означає, що цей пластик буде впливати на роботу антени за рахунок саме цієї провідності.

Загалом, очевидно, що на антену можуть впливати діелектрична проникність матеріалу і його провідність. Діелектрична проникність зміщує настройку на резонансну частоту, а провідність спричиняє втрати енергії у елементах конструкції. Матеріал PLA значно краще підходить для використання в конструкції антен, оскільки має кращі ізоляційні властивості і меншу діелектричну проникність. Але при температурі понад 70°C він стає гіршим за PETG. Проте в цілому PETG має кращі механічні властивості (Додаток Е).

Слід також зазначити, що якщо є можливість, слід налаштовувати антену з усіма конструктивними елементами, а не ставити їх уже після налаштування антени. Крім того, слід вживати заходів по захисту пластику від вологи, тому що надруковані деталі сильно поглинають вологу, відповідно зміщується резонансна частота радіоканалу передачі даних.

Якість продукції набуває все більшого значення, часто є вирішальним аргументом конкуренції споживачів. Тільки високий рівень якості продукції, що випускається з використанням технологій АВ може забезпечити не тільки розширення можливостей бойового застосування БПЛА, але й надійний ринок збуту для виробників такої продукції. Застосовуючи штучний інтелект, можна розробляти системи, які використовують комп'ютерний зір для контролю за процесом АВ та усунення несправностей.

3.8 Реалізація методу і засобу змішування полімерів в екструдері

Технологія виготовлення пластикових виробів є зріла, щоб легко перейти від виготовлення пакетів до виготовлення 3D-ниток. У цій галузі вже спостерігається великий бум, і дуже часто на ринку випускається новий тип ниток (нові кольори, покращені механічні властивості, нові композити, нові функції). Дослідження в цьому напрямку також швидко прискорюються. З точки зору досліджень, основний інтерес представляють прості методи створення і тестування нових ниток. Хоча складні, повністю автоматизовані екструзійні машини вже існують, для дослідницьких цілей мініатюризація машин є більш бажаною, оскільки потрібна невелика кількість. Більш того, при вивченні

нанопоповнювачів великі екструдери – не найкращий варіант. Існує два основних технічних підходи до виготовлення ниток в лабораторії з урахуванням змішування вихідної сировини.

Перший підхід виготовлення ниток з урахуванням змішування полягає у механічному попередньому змішуванні гранул з наповнювачем в ємності, а потім їх заливка в екструдер для другого механічного перемішування в екструдері. Друге механічне перемішування дозволить диспергувати наповнювач в розплавлений полімер, тому отримана нитка буде композитом наповнювача, гомогенно диспергованого в полімері. Якщо потрібна краща дисперсія, композитну нитку можна нарізати невеликими гранулами і знову екструдувати [31].

Другий підхід виготовлення ниток з урахуванням змішування полягає в розчиненні полімеру в розчиннику (наприклад, PLA розчиняється в хлороформі) і додаванні наповнювача в отриманому розчині. Потім повільно випарюють ацетон, одночасно перемішуючи розчин. Залежно від наповнювача, диспергування може вимагати більш просунутих методів (ультразвук, зниження в'язкості розчинів для уникнення осідання наповнювача) [12–14]. Коли дисперсність наповнювача вважається гомогенною, рідкий композит буде розподілятися тонкими шарами на великій опорі для більш швидкого випаровування залишку ацетону, і меншого осідання. Висушений композит покаже пористість, але це буде усунуто на етапі екструзії. Важливо, щоб весь ацетон перед екструзією був випарений, інакше перша нитка буде пористою. Сухі тонкі пласти нарізаються на невеликі гранули для екструзії.

На рисунку 3.39 показана розроблена схема змішування двох різних полімерів в екструдері.

Процес змішування двох полімерів в екструдері полягає у наступному:

– подавання полімерів (7 і 8). Два різні полімери (7 – полімер 1, 8 – полімер 2) подаються у систему екструдера через окремі канали;

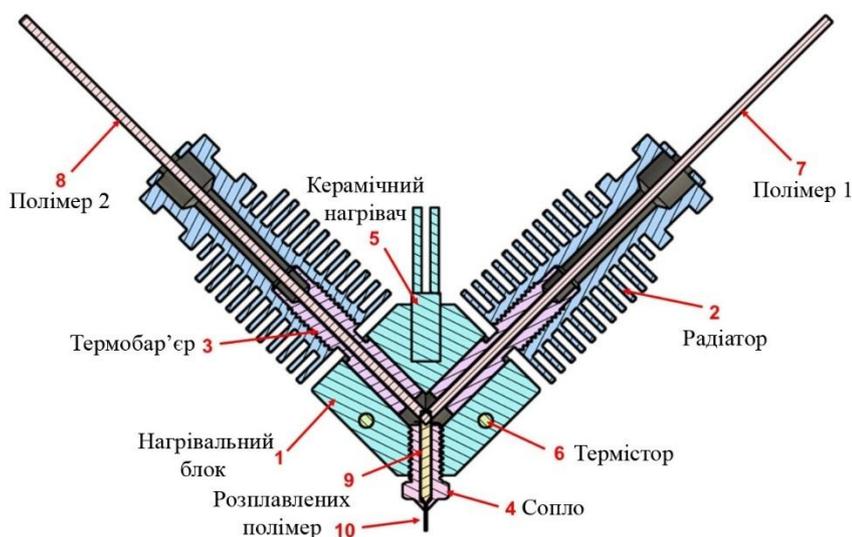


Рис. 3.39 – Принцип розробленої схеми змішування двох різних полімерів в екструдері

– охолодження та підтримка температури (2 – радіатор). Полімери проходять через радіатори (2), які підтримують філамент у твердому стані на цьому етапі та запобігають передчасному плавленню в зоні термобар'єра;

– зона термобар'єра (3). Термобар'єр (3) забезпечує теплову ізоляцію між радіатором (2) та нагрівальним блоком (1), що дозволяє підтримувати чіткий температурний перехід;

– нагрівання полімерів (5 – керамічний нагрівач). У нагрівальному блоці (1) керамічний нагрівач (5) підігріває полімери до розплавленого стану. Температура контролюється термістором (6) для точності та стабільності;

– змішування розплавлених полімерів (1 і 9). Обидва розплавлені полімери одночасно надходять у змішувальну камеру (9), де вони об'єднуються. У цій камері можуть відбуватися додаткові механічні або турбулентні процеси для рівномірного змішування матеріалів;

– екструзія змішаного полімеру (4 – сопло). Змішаний розплавлений полімер (9) витискається через сопло (4), де він остаточно формує вихідний потік матеріалу;

– вихід матеріалу (10 – вихідний полімер). На виході (10) утворюється змішаний матеріал, готовий для осадження на платформу. В залежності від

налаштувань друку, цей матеріал може мати нові властивості, наприклад, змінені колір, механічні характеристики або температурну стійкість.

Висновки до третього розділу

У розділі було обґрунтовано вибір полімерних матеріалів, з урахуванням їх фізико-механічних та електромагнітних властивостей, зокрема – у контексті перспектив їх застосування в конструкціях БПЛА та інших виробках зі спеціальними вимогами. Обрано програмні засоби моделювання та підготовки дослідних зразків із використанням сучасних CAD/CAM-інструментів. Побудовано моделі, що враховують параметри змішування полімерів та вплив властивостей матеріалів на процес і результат 3D-друку. Описано повний цикл виготовлення дослідних зразків та впровадження системи контролю на етапах проектування, друку й аналізу результатів. Наведено результати випробувань та досліджень механічних властивостей надрукованих зразків, а також показано ефективність розробленої технології для виявлення дефектів на ранніх етапах друку. Наведено результати дослідження різних характеристик композитних матеріалів. Від вибору матеріалів з певними характеристиками для композитних матеріалів залежить ефективність застосування елементів військового озброєння в реальних умовах. Розділ містить відомості про числові фізико-механічні характеристики, які були отримані експериментально з використанням сучасних технологій, у тому числі й апаратного забезпечення. Практична частина розділу містить дослідження ефективності використання композитних матеріалів (полімерів) на розтяг. Аналіз і візуалізація одержаних експериментальних числових даних наведена у Додатку Г. Представлені результати дослідження радіопрозорості різних матеріалів, які показали доцільність виготовлення конструктивних елементів антени БПЛА з PLA.

РОЗДІЛ 4

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ 3D-ДРУКУ

4.1 Складники розробленої інформаційно-вимірювальної технології

Опис складників інформаційно-вимірювальної технології (ІВТ), розробленої для забезпечення якості виробів під час 3D-друку, передбачає системну інтеграцію технічного, інформаційного, математичного та програмного забезпечення. Структура ІВТ враховує необхідність збору, обробки та аналізу зображень у реальному часі, а також автоматичного реагування на виявлені дефекти у процесі друку. У цьому підрозділі детально представлено кожен ключовий компонент системи, починаючи з апаратної бази й закінчуючи інтелектуальним програмним модулем, що забезпечує функціонування всієї технології.

1) Технічне забезпечення.

- ✓ 3D-принтер Bambu Lab X1 Series.
- ✓ Камера ОАК-D S2 для формування БД зразків зображень (кадрів), та для фіксування помилок друку вже навченої нейромережевої моделі забезпечення якості виробів адитивного виробництва.
- ✓ Персональний комп'ютер для роботи ІВТ.

2) Інформаційне забезпечення.

- ✓ Сформована БД зі зразками класичних дефектів елементів друку, які виникають в процесі 3D-друку.
- ✓ Підготовчі методи коригування зображень, методи нормалізації й стандартизації зображень, метод гамма-корекції зображень, методи знаходження чисельного розв'язку рівняння Пуассона.

3) Математична модель препроцесінгу.

Модель процесу вирівнювання інтенсивності пікселів для покращення візуалізації ознак елементів 3D-друку з метою підвищення ефективності розпізнавання основних типів дефектів у ході друку (реалізація на PYTHON).

4) Нейромережева модель.

- ✓ Модель нейромережевого типу пошуку дефектів у кадрах (зображеннях), які отримуються зі спеціальної камери (реалізація на PYTHON).

5) Програмне забезпечення (Software).

Програмне забезпечення, яке працює з апаратною частиною (вимірювальні елементи – 3D-принтер, камера), ідентифікує й класифікує помилки у процесі друку (Додаток Е). Програмне забезпечення автоматично зупиняє процес 3D-друку після ідентифікації помилок друку (взаємодія програмної й апаратної частини ІВТ).

4.2 Формування даних для навчання моделі розпізнавання основних типів дефектів 3D-друку в реальному часі

Підготовка даних. У ході проведення спостережень з використанням сучасної камери, яка адаптована для 3D-друку, була створена база даних для навчання зі зразками дефектів 5 типів: 0 – дефект «спагеті»; 1 – дефект відшарування; 2 – дефект «зміщення шарів»; 4 – дефект у вигляді тріщини; 5 – дефект відсутній. Кількість зразків кожного класу – 500 (всього 3000 зображень).

Етапи підготовки даних

1. Перемішування вхідних даних бази.
2. Подання даних на вхід для навчання: 75 % вибірки.
3. Подання даних на вхід для валідації: 25% вибірки.
4. Візуалізація випадкових кадрів з різними видами дефектів.

Етапи навчання

1. Подання блоків по 32 зразка на навчання (з усіх 75% (2250 зразків))
2. Визначення кількості ітерацій (epoch) – Max 100.

Процес навчання мережі виду CNN.

4.3 Архітектура штучної згорткової нейронної мережі для розпізнавання дефектів друку в реальному часі

Кількість зразків кожного класу – 500 (всього 3000 зображень). Навчання – 75 % вибірки, валідація – 25%. Нейронна мережа має архітектуру CNN.

У таблиці 4.1 наведено з приклад успішної архітектури, яка була використана для розпізнавання образів основних дефектів друку, які виникають в процесах адитивного виробництва.

Таблиця 4.1 – Одна із реалізованих архітектур згорткової нейронної мережі (CNN)

Input Layer	224x224x3 (RGB зображення)
Conv Layer 1	32 фільтри розміром 3x3, активація ReLU
Max Pooling Layer 1	2x2
Conv Layer 2	64 фільтри розміром 3x3, активація ReLU
Max Pooling Layer 2	2x2
Conv Layer 3	128 фільтри розміром 3x3, активація ReLU
Flatten Layer	перетворення 2D вектору в 1D
Fully Connected Layer (Dense Layer)	512 нейронів, активація ReLU
Output Layer	6 нейронів, активація Softmax (для 6 класів)

Слід зазначити, що у таблиці 4.1 введені такі математичні операції

- 1) Матрична згортка, яка подається математично у такому вигляді:

$$Conv(x, y) = \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-m}^m \left(Image(x + i, y + j) \times Kernel(i + m, j + m) \right),$$

де

$Kernel$ – матриця вагових коефіцієнтів (ядро згортки),

$Image(x + i, y + j)$, $i, j = \overline{-m; m}$, $m \in N$ – фрагмент кадру.

- 2) Функція активації ReLU, яка має вигляд:

$$f_{ReLU}(x) = \max(0; x), \quad x - \text{вихід із внутрішнього шару мережі.}$$

- 3) Функція активації SoftMax, яка має вигляд:

$$SoftMax(r_i) = e^{-r_i} / \sum_{i=1}^s e^{-r_i}, \quad r_i - \text{вихід мережі з останнього шару;}$$

$SoftMax(r_i)$ – імовірність належності дефекту до i -го класу.

Результати навчання на тестовій та валідаційній частинах вибірки подані на рисунку 4.1, рисунку 4.2 і рисунку 4.3.

Рисунок 4.1 демонструє результати навчання на 10 ітераціях (епоках). Як видно з рисунка 4.1 на навчальній і на тестовій (валідаційній) підвибірках значення цільової функції спадає. Це означає, що перенавчання нейромережевої моделі відсутнє.

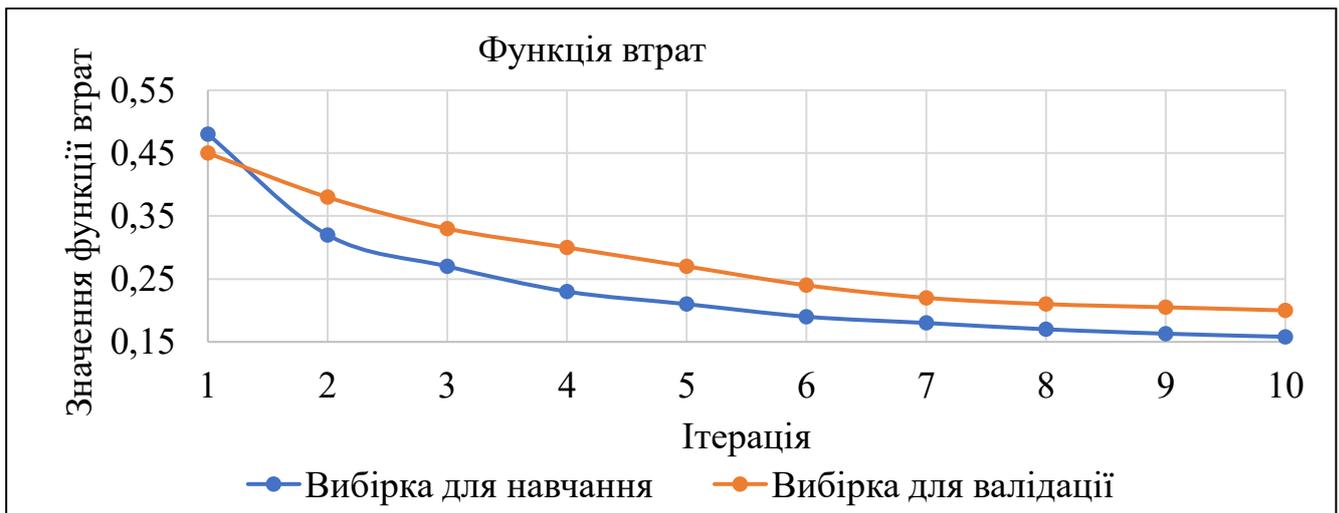


Рис. 4.1 – Збіжність в ході навчання нейронної мережі у процесі навчання (на тестовій та валідаційній підвибірках)

Очевидно, що результати, які показані на рисунку 4.1 не дають ще остаточно вважати, що процес навчання є якісний. Для цього на рисунку 4.2 показано результати середньої валідації на тестовій і навчальній підвибірках.

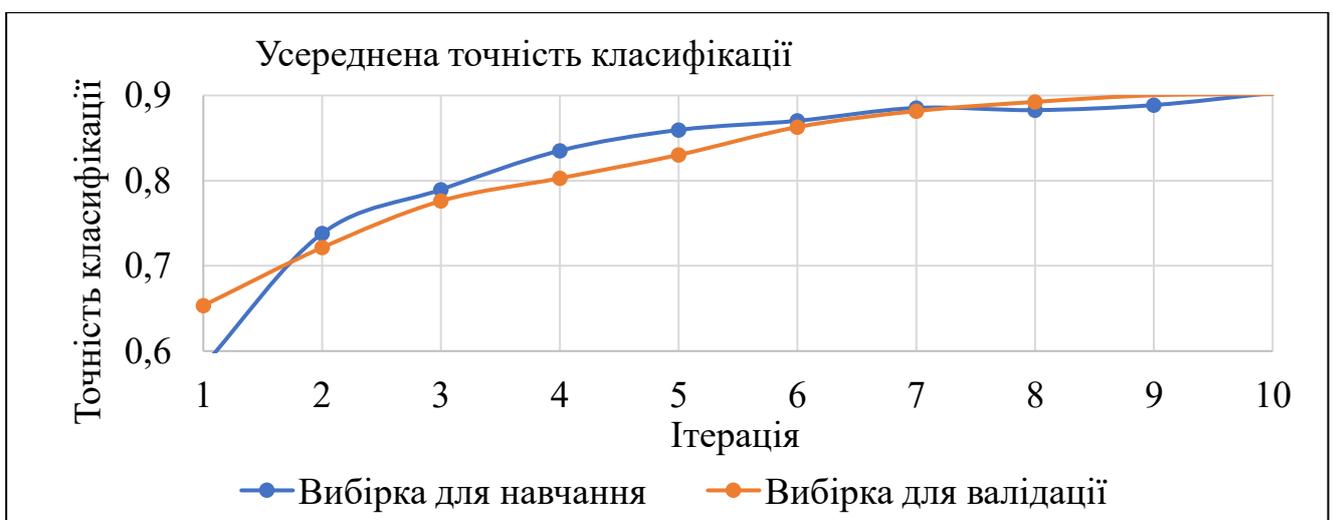


Рис. 4.2 – Результати тестування розробленої архітектури нейромережевої математичної моделі як середнє по усіх класах

Для формування статистики навчання математичної моделі нейромережевого типу, яка подана на рисунку 4.2 враховувались наведені вище формули:

$$Accuracy_s = \frac{N_{Corrects_s}}{N_s}, Accuracy = \frac{\sum_{s=1}^N N_{Corrects_s}}{\sum_{s=1}^N N_s},$$

де N_s – загальна кількість зразків класу s , $N_{Corrects_s}$ – кількість правильно розпізнаних зразків класу s , $Accuracy_s$ – загальна точність розпізнавання по класу s , $Accuracy$ – середня точність класифікації по вибірці.

Рисунок 4.3 містить порівняльний аналіз результатів валідації однієї і тої ж математичної моделі нейромережевого типу з різними вже відомими методами, які були використані у якості методів препроцесингу даних перед навчанням.

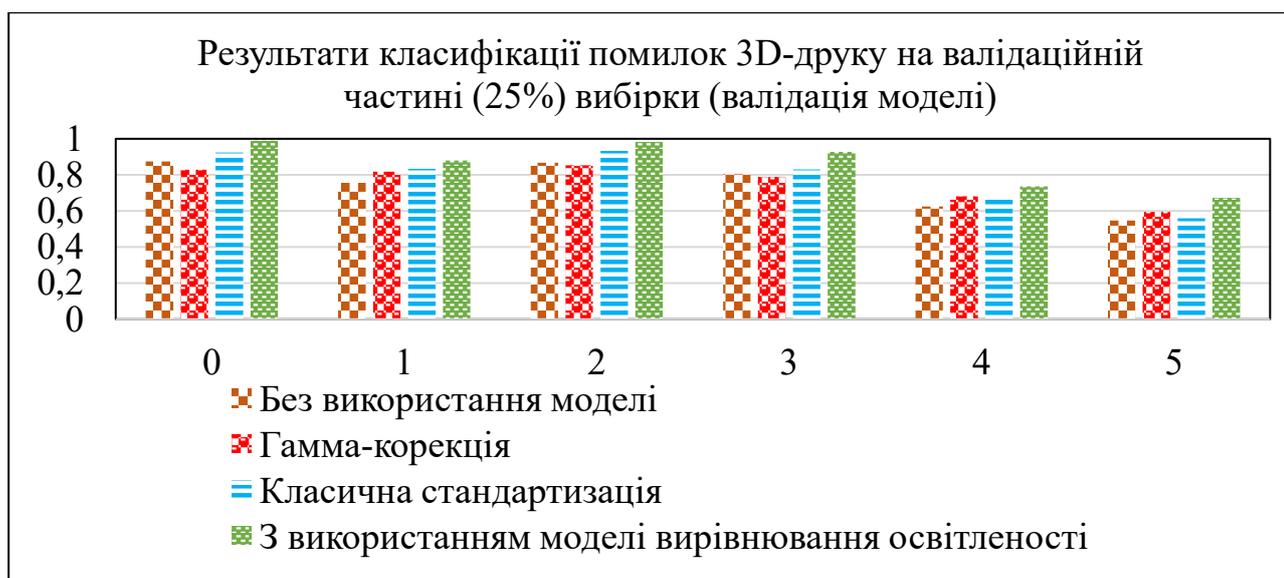


Рис. 4.3 – Порівняльний аналіз навчання нейромережевої математичної моделі з використанням запропонованої моделі препроцесингу, на вже відомих методів (гамма-корекція, класична стандартизація), а також без препроцесингу

Кращий результат навчання був отриманий з використанням запропонованої математичної моделі вирівнювання інтенсивності (яскравості) пікселів у зображеннях бази даних, яка використана була для навчання і валідації моделі.

4.4 Взаємодія програмної й апаратної частини інформаційно-вимірювальної технології

На рисунку 4.4 показано загальну схему, яка містить 2 блоки – обчислювальний (програмний) блок і апаратний блок.

Обчислювальний блок складається з модуля опрацювання кадрів для поліпшення розпізнавання дефектів в об'єктах 3D-друку (програмна частини контролю безперервності друку), а також модуля зі штучним інтелектом для розпізнавання елементів 3D-друку.

Модуль опрацювання кадрів містить реалізацію: метода вирішення системи лінійних рівнянь з розрідженою матрицею; метода дискретизації рівняння Пуассона; задання граничних умов; бібліотеку для формування і навчання моделей на основі нейронних мереж; збереження результатів тощо.

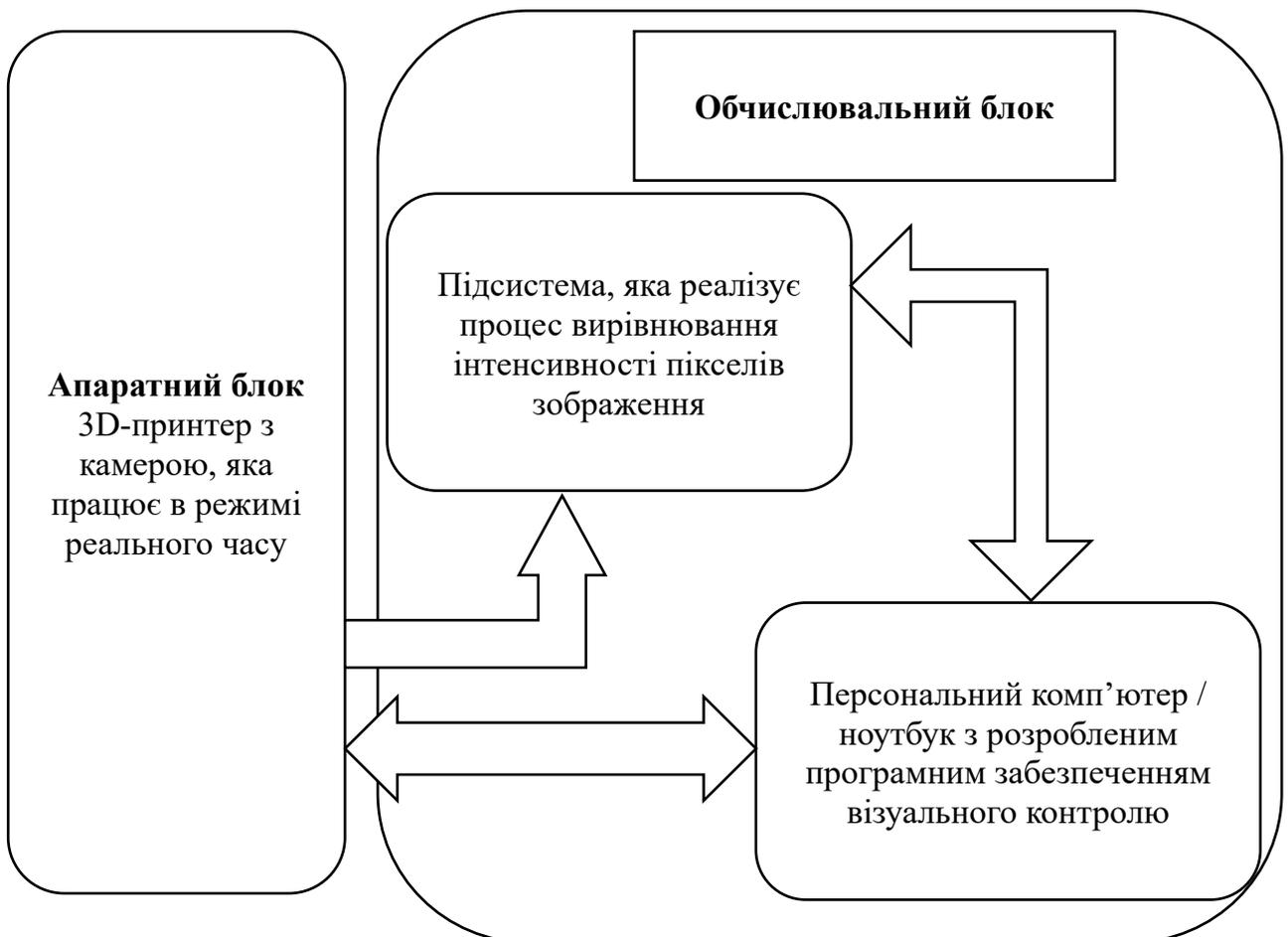


Рис. 4.4 – Взаємодія програмного і апаратного (обчислювального) блоку

Нижче наведені складники розробленої інформаційно-вимірювальної технології.

1) Технічне забезпечення

- ✓ 3D-принтер Bambu Lab X1 Series.
- ✓ Камера OAK-D S2 для формування БД зразків зображень (кадрів), та для фіксування помилок друку вже навченої нейромережевої моделі забезпечення якості виробів адитивного виробництва.
- ✓ Персональний комп'ютер для взаємодії програмної й апаратної частини ІВТ

2) Інформаційне забезпечення

- ✓ Сформована БД зі зразками класичних дефектів елементів друку, які виникають в процесі 3D-друку.
- ✓ Підготовчі методи коригування зображень.
- ✓ Методи нормалізації й стандартизації зображень.
- ✓ Метод гамма-корекції зображень.
- ✓ Методи знаходження чисельного розв'язку рівняння Пуассона.

3) Математична модель препроцесінгу

Модель процесу вирівнювання інтенсивності пікселів для покращення візуалізації ознак елементів 3D-друку з метою підвищення ефективності розпізнавання основних типів дефектів у ході друку (реалізація на PYTHON).

4) Нейромережева модель

- ✓ Модель нейромережевого типу пошуку дефектів у кадрах (зображеннях), які отримуються зі спеціальної камери (реалізація на PYTHON).

5) Програмне забезпечення (Software)

- ✓ Програмне забезпечення, яке працює з апаратною частиною (вимірювальні елементи – 3D-принтер, камера), ідентифікує й класифікує помилки у процесі друку. Програмне забезпечення автоматично зупиняє процес 3D-друку після ідентифікації помилок друку(взаємодія програмної й апаратної частини ІВТ).

4.5 Валідація інформаційно-виміральної технології

Нижче на рисунках 4.5–4.7 показано процес реагування розробленої інформаційно-виміральної технології, яка полягає у тестуванні програмного комплексу та її взаємодію з апаратною частиною з метою зупинки друку під час фіксування дефекту друку.

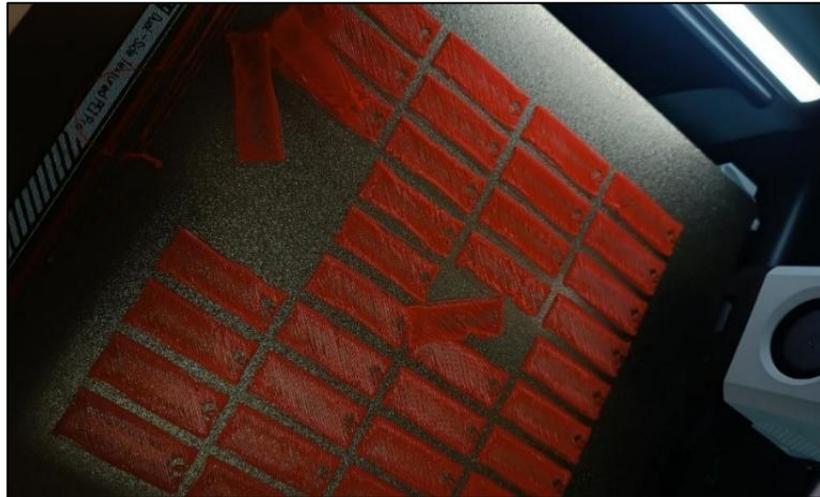


Рис. 4.5 – Приклад друку, у результаті якого друку було отримано дефект «першого шару»

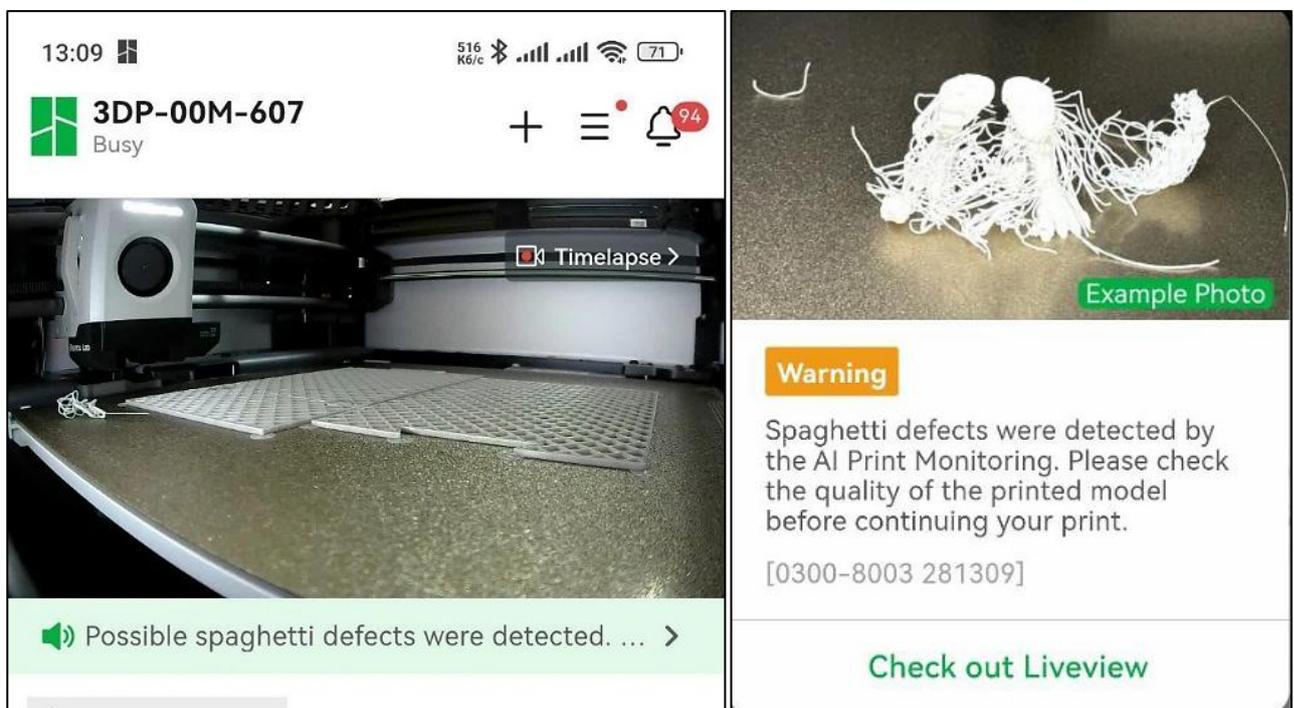


Рис. 4.6 – Результат роботи програмного забезпечення з фіксацією дефекту типу вигляді «спагеті»

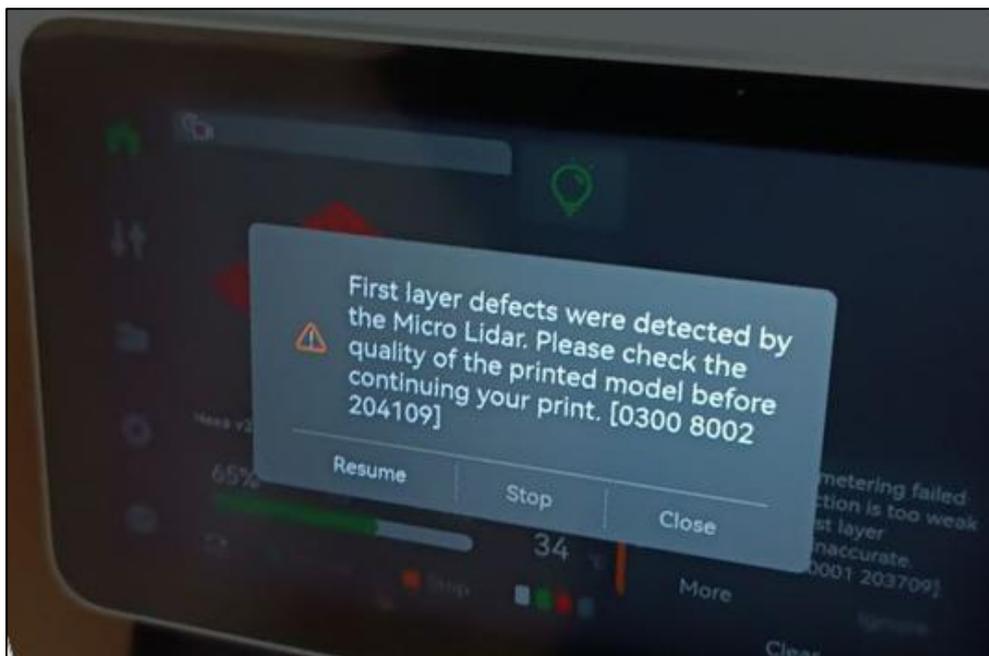


Рис. 4.7 – Результат зупинки процесу друку в ході виявлення дефекту друку

Слід також зазначити, що дефекти такого роду характеризуються хаотичним нагромадженням екструдованого матеріалу у вигляді ниткоподібних структур, що призводить до повного руйнування геометрії моделі. Акти впровадження практичних наукових результатів наведені у Додатку Ж до дисертаційної роботи. Вивчення умов його виникнення має важливе значення для запобігання втрати матеріалу та часу.

Висновки до четвертого розділу

У даному розділі дисертаційної роботи представлено комплексну інформаційно-вимірювальну технологію для забезпечення якості виробів у процесі 3D-друку. Інформаційно-вимірювальна технологія включає кілька взаємопов'язаних компонентів, зокрема, це: 3D-принтер Bambu Lab X1 Series та камеру OAK-D S2, адаптовану для збору зображень дефектів у режимі реального часу; персональний комп'ютер, який забезпечує взаємодію між програмним і апаратним блоками; базу даних з 3000 зображень дефектів 5 типів («спагеті», відшарування, зміщення шарів, тріщина, відсутність дефекту) по 500 зразків кожного класу. Також реалізовано методи препроцесингу: нормалізація й стандартизація зображень, гамма-корекція зображень та запропонований метод, що базується на пошуку чисельного розв'язку рівняння Пуассона для вирівнювання інтенсивності пікселів; нейромережева модель, за допомогою якої виконується розпізнавання типових об'єктів 3D-друку.

Особливу увагу приділено практичній частині, яка полягає у створенні нейромережевої моделі як основної компоненти інформаційно-вимірювальної технології, зокрема: запропоновано CNN-архітектуру (3-рівні згортки, $224 \times 224 \times 3 \rightarrow 6$ вихідних нейронів з SoftMax), що реалізована в Python. Мережа навчається на 2250 зразках (75% навчальна вибірка), валідується на 750 зразках (25%). Використано батчі по 32 елементи, максимальна кількість епох – 100. Розроблені програмні модулі взаємодіють з 3D-принтером та камерою, яка одержує зображення в ході друку через деякий проміжок часу, здійснює розпізнавання дефектів і автоматично зупиняє друк при виявленні помилки. Статистичний аналіз навчання підтвердив відсутність перенавчання і вищу ефективність моделі препроцесингу порівняно з класичними підходами.

Запропонована ІВТ охоплює весь цикл: від збору даних і їх препроцесингу до автоматизованої реакції на виявлені дефекти.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу підвищення якості та надійності процесів 3D-друку складних об'єктів шляхом розроблення й впровадження інформаційно-вимірювальної технології, яка базується на методах комп'ютерного зору, чисельного аналізу та штучного інтелекту. Проведено систематичний аналіз сучасних технологій 3D-друку та визначено їх особливості з урахуванням складності виготовлення виробів, типів матеріалів і технологічних обмежень. Показано, що вибір технології 3D-друку значною мірою впливає на якість і безперервність процесу виготовлення об'єктів, зокрема у випадках високої точності та складної внутрішньої структури. Розглянуто основні джерела помилок у процесі адитивного виробництва та систематизовано методи їх виявлення і мінімізації. Досліджено потенціал використання комп'ютерного зору для онлайн-моніторингу процесу друку з метою оперативного виявлення дефектів і забезпечення неперервності виготовлення. Розроблено математичну модель вирівнювання яскравості пікселів на зображеннях, яка є складником інформаційно-вимірювальної технології, та дозволяє усунути негативний вплив змінного освітлення під час аналізу кадрів процесу 3D-друку. Модель протестована на різноманітних зображеннях, що дозволило суттєво підвищити якість подальшого аналізу та обробки зображень.

Показано, що розроблена інформаційно-вимірювальна технологія дає змогу підвищити точність і надійність процесу 3D-друку за рахунок раннього виявлення дефектів і оперативного реагування, що відкриває перспективи для її впровадження у високотехнологічне виробництво, зокрема в авіаційній, медичній, енергетичній та оборонній галузях.

Запропоновані в роботі методи, моделі і засоби в сукупності у вигляді інформаційно-вимірювальної технології відкривають можливість вирішити проблеми підвищення якості виробів, отриманих за технологією 3D-друку, що пов'язано з виявленням більшості типових дефектів друку, і за рахунок цього

забезпечити економію витратних матеріалів, електроенергії та зменшення тривалості виготовлення друкованих деталей.

У ході виконання дисертаційної роботи:

– розроблено інформаційно-вимірювальну технологію контролю якості виробів адитивного виробництва, яка включає: технічне апаратне забезпечення (3D-принтер Bambu Lab X1 Series, камера OAK-D S2), інформаційне забезпечення зі сформованою базою даних зі зразками класичних дефектів елементів друку; методи нормалізації й стандартизації зображень, математичну модель препроцесінгу зображень з об'єктами друку; модель процесу вирівнювання інтенсивності пікселів; нейромережеву модель для пошуку дефектів у кадрах (зображеннях), які отримуються зі спеціальної камери (реалізація на PYTHON); персональний комп'ютер для взаємодії програмної й апаратної частини ІВТ. Розроблена ІВТ дає можливість виконувати препроцесінг вхідних кадрів (знімків процесу друку) з метою підвищення точності розпізнавання класичних дефектів, які виникають у процесах серійного адитивного виробництва;

– розроблено математичну модель, яка описує процес вирівнювання інтенсивності пікселів у зображеннях виробів адитивного виробництва, що дало змогу здійснювати контроль якості виробів в процесі їх 3D-друку;

– удосконалено методи пошуку наближених розв'язків задач математичної фізики еліптичного типу, які використовуються для препроцесінгу зображень перед процедурою машинного навчання з метою розпізнавання дефектів друку у реальному часі, що забезпечує оптичний (візуальний) контроль процесів адитивного виробництва загалом.

Застосування розробленої інформаційно-вимірювальної технології дало можливість розпізнавати типові дефекти 3D-друку з точністю 93%–97%, що на 3%–5% вище за існуючі аналоги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Shavarani, S.M.; Nejad, M.G.; Rismanchian, F.; Izbirak, G. Application of hierarchi facility location problem for optimization of a drone delivery system: A case study of amazon prime air in the city of san francisco. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018, 95. Pp. 3141–3153.
2. Saari, M.; Cox, B.; Richer, E.; Krueger, P.S.; Cohen, A.L. Fiber encapsulation additive manufacturing: An enabling technology for 3D printing of electromechanical devices and robotic components. *3D Print. Additive Manufacturing* 2015, 2. Pp. 32–39.
3. Park, C.Y.; Jang, B.-W.; Kim, J.H.; Kim, C.-G.; Jun, S.-M. Bird strike event monitoring in a composite UAV wing using high speed optical fiber sensing system. *Compos. Sci. Technol.* 2012, 72. Pp. 498–505.
4. Alberdi, A.; Artaza, T.; Suárez, A.; Rivero, A.; Girot, F. An experimental study on abrasive waterjet cutting of stacks for drilling operations. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, 86. Pp. 691–704.
5. Liu, Y.; Zwingmann, B.; Schlaich, M. Carbon fiber reinforced polymer for cable structures—A review. *Polymers* 2015, 7. Pp. 2078–2099.
6. Wall, R. Material change. *Aviat. Week Space Technol.* 2005, 162. Pp. 42–43.
7. Garden, H.N.; Hollaway, L.C.; Thorne, A.M. A preliminary evaluation of carbon fibre reinforced polymer plates for strengthening reinforced concrete members. *Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build.* 1997, 122. Pp. 127–142.
8. Kim, Y.J.; Green, M.F.; Wight, R.G. Flexural behaviour of reinforced or prestressed concrete beams including strengthening with prestressed carbon fibre reinforced polymer sheets: Application of a fracture mechanics approach. *Can. J. Civ. Eng.* 2007, 34. Pp. 664–677.
9. Feraboli, P.; Morris, C.; McLarty, D. Design and certification of a composite thin-walled structure for energy absorption. *Int. J. Veh. Des.* 2007, 44. Pp. 247–267.
10. Troiani, E.; Falaschetti, M.P.; Taddia, S.; Ceruti, A. Crash absorbers in small UAV: Design and optimization. *SAE Tech. Pap.* 2015.

11. Qiu, L.; Yuan, S.F.; Miao, M. An evaluation research on the wing box structural health monitoring system based on fbg sensor. *Yadian Yu Shengguang / Piezoelectr. Acoustoopt.* 2009, 31. Pp. 350–353.
12. Kumagai, K.; Todoroki, A.; Matsuzaki, R. Self-sensing and self actuating structure using partially flexible composite. In *Proceedings of the SPIE – The International Society for Engineering*, San Diego, CA, USA, 9–13 March 2008. Frulla, G.; Cestino, E. Design, manufacturing and testing of a hale-UAV structural demonstrator. *Compos. Struct.* 2008, 83. Pp. 143–153.
13. Stephani, P.; Middendorf, P.; Leß, C. Numerical analysis of the hydrodynamic of a integral tank. *WIT Trans. Built Environ.* 2006, 87. Pp. 45–53.
14. Salonitis, K.; Stavropoulos, P.; Fysikopoulos, A.; Chryssolouris, G. CO2 laser butt-welding of steel sandwich sheet composites. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2013, 69. Pp. 245–256.
15. Mathivanan, N.R.; Jerald, J.; Behera, P. Analysis of factors influencing deflection in sandwich panels subjected to low-velocity impact. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2011, 52. Pp. 433–441.
16. Zhao, Z.; Li, B.; Xu, L.; Qiao, Y.; Wang, F.; Xia, Q.; Lu, Z. A sandwich-structured piezoresistive sensor with electrospun nanofiber mats as supporting, sensing, and packaging layers. *Polymers* 2018, 10. Pp. 575.
17. Dweib, M.A.; Hu, B.; O'Donnell, A.; Shenton, H.W.; Wool, R.P. All natural composite sandwich beams for structural applications. *Compos. Struct.* 2004, 63. Pp. 147–157.
18. Kant, T. A critical review and some results of recently developed refined theories of fiber-reinforced laminated composites and sandwiches. *Compos. Struct.* 1993, 23. Pp. 293–312.
19. Anderson, T.; Madenci, E. Experimental investigation of low-velocity impact characteristics of sandwich composites. *Compos. Struct.* 2000, 50. Pp. 239–247.
20. Finnegan, K.; Kooistra, G.; Wadley, H.N.G.; Deshpande, V.S. The compressive response of carbon fiber composite pyramidal truss sandwich cores. *Int. J. Mater. Res.* 2007, 98. Pp. 1264–1272.

21. Williams, H.R.; Trask, R.S.; Bond, I.P. Self-healing composite sandwich structures. *Smart Mater. Struct.* 2007, 16. Pp. 1198–1207.

22. Liu, C.; Huang, N.; Xu, F.; Tong, J.; Chen, Z.; Gui, X.; Fu, Y.; Lao, C. 3D printing technologies for flexible tactile sensors toward wearable electronics and electronic skin. *Polymers* 2018, 10. Pp. 629.

23. Díaz Lantada, A. Systematic development strategy for smart devices based on shape-memory polymers. *Polymers* 2017, 9. Pp. 496.

24. Hassanin, H.; Modica, F.; El-Sayed, M.A.; Liu, J.; Essa, K. Manufacturing of ti-6al-4v micro-implantable parts using hybrid selective laser melting and micro-electrical discharge machining. *Adv. Eng. Mater.* 2016, 18. Pp. 1544–1549.

25. Sabouri, A.; Yetisen, A.K.; Sadigzade, R.; Hassanin, H.; Essa, K.; Butt, H. Three-dimensional microstructured lattices for oil sensing. *Energy Fuels* 2017, 31. Pp. 2524–2529.

26. Qiu, C.; Adkins, N.J.E.; Hassanin, H.; Attallah, M.M.; Essa, K. In-situ shelling via selective laser melting: Modelling and microstructural characterisation. *Mater. Des.* 2015, 87. Pp. 845–853.

27. Qiu, C.; Yue, S.; Adkins, N.J.E.; Ward, M.; Hassanin, H.; Lee, P.D.; Withers, P.J.; Attallah, M.M. Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting. *Mater. Sci. Eng. A* 2015, 628. Pp. 188–197.

28. Cox, S.C.; Jamshidi, P.; Eisenstein, N.M.; Webber, M.A.; Hassanin, H.; Attallah, M.M.; Shepherd, D.E.T.; Addison, O.; Grover, L.M. Adding functionality with additive manufacturing: Fabrication of titanium-based antibiotic eluting implants. *Mater. Sci. Eng. C* 2016, 64. Pp. 407–415.

29. Mostafa, A.; Shankar, K.; Morozov, E.V. Insight into the shear behaviour of composite sandwich panels with fam core. *Mater. Des.* 2013, 50. Pp. 92–101.

30. Askanian, H.; Muranaka de Lima, D.; Commereuc, S.; Verney, V. Toward a better understanding of the fused deposition modeling process: Comparison with injection molding. *3D Print. Addit. Manuf.* 2018.

31. Adia, G.A.O.; Zimmer, D. Design for additive manufacturing—Element transitions and aggregated structures. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 2014, 7. Pp. 20–28.
32. Klippstein, H.; Hassanin, H.; Diaz De Cerio Sanchez, A.; Zweiri, Y.; Seneviratne, L. Additive manufacturing of porous structures for unmanned aerial vehicles applications. *Adv. Eng. Mater.* 2018, 20. Pp. 180–190.
33. Stratasys. Production-grade Thermoplastic for Fortus 3d Production Systems. Available online: http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Material_Spec_Sheets/MSS_FDM_ABSi.pdf (accessed on 13 May 2018).
34. Torrado, A.R.; Shemelya, C.M.; English, J.D.; Lin, Y.; Wicker, R.B.; Roberson, D.A. Characterizing the effect of additives to abs on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing. *Addit. Manuf.* 2015, 6. Pp. 16–29.
35. Mukherjee, T.; Kao, N. Pla based biopolymer reinforced with natural fibre: A review. *J. Polym. Environ.* 2011, 19. Pp. 714–725.
36. Bajpai, P.K.; Singh, I.; Madaan, J. Development and characterization of pla-based green composites: A review. *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 2014, 27. Pp. 52–81.
37. Ciceri-de-Mondel-srl-Unipersonale. Filoalfa Filament. Available online: <http://www.filoalfa3d.com>.
38. All3DP. Best Types of 3d Printer Filament: Guide & Comparison Charts. Режим доступа: <https://all3dp.com/1/3d-printer-filament-types-3d-printing-3d-filament/#nylon>.
39. Klippstein, H.; Diaz De Cerio Sanchez, A.; Hassanin, H.; Zweiri, Y.; Seneviratne, L. Fused deposition modeling for unmanned aerial vehicles (UAVs): A review. *Adv. Eng. Mater.* 2018, 20, 1700552.
40. Belter, J.T.; Dollar, A.M. Strengthening of 3D printed robotic parts via fill compositing. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Chicago, IL, USA, 14–18 September 2014*. Pp. 2886–2891.

41. Li, G.; Zhao, J.; Wu, W.; Jiang, J.; Wang, B.; Jiang, H.; Fuh, J.Y.H. Effect of ultrasonic vibration on mechanical properties of 3d printing non-crystalline and semi-crystalline polymers. *Materials* 2018, 11, 826.

42. Ravi, A.K.; Deshpande, A.; Hsu, K.H. An in-process laser localized pre-deposition heating approach to inter-layer bond strengthening in extrusion based polymer additive manufacturing. *J. Manuf. Process.* 2016, 24, Pp. 179–185.

43. Tootooni, M.S.; Dsouza, A.; Donovan, R.; Rao, P.K.; Kong, Z.J.; Borgesen, P. Classifying the dimensional variation in additive manufactured parts from laser-scanned three-dimensional point cloud data using machine learning approaches. *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME* 2017, 139, 091005.

44. Ponnusamy, P.; Masood, S.H.; Ruan, D.; Palanisamy, S.; Mohamed, O.A. Statistical analysis of porosity of 17-4ph alloy processed by selective laser melting. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*; IOP Publishing: Bristol, UK, 2017.

45. Pawlak, A.; Rosienkiewicz, M.; Chlebus, E. Design of experiments approach in az31 powder selective laser melting process optimization. *Arch. Civ. Mech. Eng.* 2017, 17, Pp. 9–18.

46. Saleem, M.M.; Somá, A. Design of experiments based factorial design and response surface methodology for mems optimization. *Microsyst. Technol.* 2015, 21, Pp. 263–276.

47. Conduit, B.D.; Jones, N.G.; Stone, H.J.; Conduit, G.J. Design of a nickel-base superalloy using a neural network. *Mat. Des.* 2017, 131, Pp. 358–365.

48. Sick, B. On-line and indirect tool wear monitoring in turning with artificial neural networks: A review of more than a decade of research. *Mech. Syst. Signal Process.* 2002, 16, Pp. 487–546.

49. Kalogirou, S.A. Artificial neural networks in renewable energy systems applications: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2000, 5, Pp. 373–401.

50. Takayama, K.; Fujikawa, M.; Nagai, T. Artificial neural network as a novel method to optimize pharmaceutical formulations. *Pharm. Res.* 1999, 16, Pp. 1–6.

51. Chattopadhyay, R.; Guha, A. Artificial neural networks: Applications to textiles. *Text. Prog.* 2003, 35. Pp. 1–46.
52. Sutariya, V.; Groshev, A.; Sadana, P.; Bhatia, D.; Pathak, Y. Artificial neural network in drug delivery and pharmaceutical research. *Open Bioinform. J.* 2013, 7. Pp. 49–62.
53. Zweiri, Y.H.; Seneviratne, L.D.; Althoefer, K. Stability analysis of a three-term backpropagation algorithm. *Neural Netw.* 2005, 18. Pp. 1341–1347.
54. Zweiri, Y.H.; Whidborne, J.F.; Seneviratne, L.D. A three-term backpropagation algorithm. *Neurocomputing* 2003, 50. Pp. 305–318.
55. Masters, J.E. Basic failure modes of continuous fibre composites. In *Engineering Materials Handbook*, 1st ed.; ASM International: Russell Township, OH, USA, 1987; Volume 1. Pp. 781–785.
56. Zhang, J.; Wang, J.; Dong, S.; Yu, X.; Han, B. A review of the current progress and application of 3D printed concrete. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 2019, 125, 105533.
57. Tobi, A.L.M.; Omar, S.A.; Yehia, Z.; Al-Ojaili, S.; Hashim, A.; Orhan, O. Cost viability of 3D printed house in UK. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2018, 319, 012061.
58. Vantyghem, G.; de Corte, W.; Shakour, E.; Amir, O. 3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization. *Autom. Constr.* 2020, 112, 103084.
59. Martens, P.; Mathot, M.; Bos, F.; Coenders, J. Optimising 3D printed concrete structures using topology optimisation, in: *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*. In *Proceedings of the 2017 Fib Symposium*, Maastricht, The Netherlands, 12–16 June 2017. Pp. 301–309.
60. Villacres, J.; Guaman, R.; Menendez, O. Auat Cheein, 3D Printing Deformation Estimation Using Artificial Vision Strategies for SmartConstruction. In *Proceedings of the IECON (Industrial Electronics Conference)*, Online Conference, 13–16 October 2021.

61. Kazemian, A.; Yuan, X.; Davtalab, O.; Khoshnevis, B. Automation in Construction Computer vision for real-time extrusion quality monitoring and control in robotic construction. *Autom. Constr.* 2019, 101. Pp. 92–98.

62. Buswell, R.; Kinnell, P.; Xu, J.; Hack, N.; Kloft, H.; Maboudi, M.; Gerke, M.; Massin, P.; Grasser, G.; Wolfs, R.; et al. Inspection Methods for 3D Concrete Printing. In RILEM Bookseries; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2020; Volume 28. Pp. 790–803.

63. Lim, S.; Buswell, R.A.; Valentine, P.J.; Piker, D.; Austin, S.A.; de Kestelier, X. Modelling curved-layered printing paths for fabricating large-scale construction components. *Addit. Manuf.* 2016, 12. Pp. 216–230.

64. Panda, B.; Lim, J.H.; Tan, M.J. Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction. *Compos. B Eng.* 2019, 165. Pp. 563–571.

65. Le, T.T.; Austin, S.A.; Lim, S.; Buswell, R.A.; Gibb, A.G.F.; Thorpe, T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Mater. Struct. Mater. Constr.* 2012, 45. Pp. 1221–1232.

66. Panda, B.; Lim, J.H.; Mohamed, N.A.N.; Paul, S.C.; Tay, Y.W.D.; Tan, M.J. Automation of robotic concrete printing using feedback control system. In Proceedings of the ISARC 2017 – Proceedings of the 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Taipei, Taiwan, 28 June–1 July 2017. Pp. 276–280.

67. Goh, G.D.; Sing, S.L.; Yeong, W.Y. A Review on Machine Learning in 3D Printing: Applications, Potential, and Challenges; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2021.

68. Nair, A.; Aditya, S.D.; Adarsh, R.N.; Nandan, M.; Dharek, M.S.; Sreedhara, B.M.; Prashant, S.C.; Sreekeshava, K.S. Additive Manufacturing of Concrete: Challenges and opportunities. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2020, 814, 012022.

69. Jolin, M.; Burns, D.; Bissonnette, B.; Gagnon, F.; Bolduc, L.-S. Understanding the pumpability of concrete. In Proceedings of the Shotcrete for Underground Support XI Engineering Conferences International, Davos, Switzerland, 7–10 June 2009. Pp. 193–207.

70. Tay, Y.W.D.; Qian, Y.; Tan, M.J. Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test. *Compos. B Eng.* 2019, 174, 106968.
71. Bos, F.; Wolfs, R.; Ahmed, Z.; Salet, T. Additive manufacturing of concrete in construction: Potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual Phys. Prototyp.* 2016, 11. Pp. 209–225.
72. Reiter, L.; Wangler, T.; Roussel, N.; Flatt, R.J. The role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete. *Cem. Concr. Res.* 2018, 112. Pp. 86–95.
73. Zhang, Y.; Zhang, Y.; She, W.; Yang, L.; Liu, G.; Yang, Y. Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. *Constr. Build Mater.* 2019, 201. Pp. 278–285.
74. Zhang, Y.; Zhang, Y.; Liu, G.; Yang, Y.; Wu, M.; Pang, B. Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink. *Constr. Build. Mater.* 2018, 174. Pp. 263–271.
75. Roussel, N. Rheological requirements for printable concretes. *Cem. Concr. Res.* 2018, 112. Pp. 76–85.
76. Rahul, A.V.; Santhanam, M.; Meena, H.; Ghani, Z. 3D printable concrete: Mixture design and test methods. *Cem. Concr. Compos.* 2019, 97. Pp. 13–23.
77. Jayathilakage, R.; Sanjayan, J.; Rajeev, P. Direct shear test for the assessment of rheological parameters of concrete for 3D printing applications. *Mater. Struct. /Mater. Constr.* 2019, 52. Pp. 1–13.
78. Malaeb, Z.; Hachem, H.; Tourbah, A.; Maalouf, T.; el Zarwi, N.; Hamzeh, F. 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design. *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 2015, 6. Pp. 14–22.
79. Ma, G.; Li, Z.; Wang, L. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. *Constr. Build Mater.* 2018, 162. Pp. 613–627.
80. Moeini, M.A.; Hosseinpour, M.; Yahia, A. Effectiveness of the rheometric methods to evaluate the build-up of cementitious mortars used for 3D printing. *Constr. Build Mater.* 2020, 257, 119551.

81. Mazhoud, B.; Perrot, A.; Picandet, V.; Rangeard, D.; Courteille, E. Underwater 3D printing of cement-based mortar. *Constr. Build Mater.* 2019, 214. Pp. 458–467.

82. Ahmed, S.; Yehia, S. Evaluation of Workability and Structuration Rate of Locally Developed 3D Printing Concrete Using Conventional Methods. *Materials* 2022, 15, 1243.

83. Izadgoshasb, H.; Kandiri, A.; Shakor, P.; Laghi, V.; Gasparini, G. Predicting compressive strength of 3D printed mortar in structural members using machine learning. *Appl. Sci.* 2021, 11, 10826.

84. Zhang, J.; Wang, P.; Gao, R.X. Deep learning-based tensile strength prediction in fused deposition modeling. *Comput. Ind.* 2019, 107. Pp. 11–21.

85. Lao, W.; Li, M.; Tjahjowidodo, T. Variable-geometry nozzle for surface quality enhancement in 3D concrete printing. *Addit. Manuf.* 2021, 37, 101638.

86. Ashrafi, N.; Duarte, J.P.; Nazarian, S.; Meisel, N.A. Evaluating the relationship between deposition and layer quality in large-scale additive manufacturing of concrete. *Virtual Phys. Prototyp.* 2019, 14. Pp. 135–140.

87. Davtalab, O.; Kazemian, A.; Yuan, X. Khoshnevis, Automated inspection in robotic additive manufacturing using deep learning for layer deformation detection. *J. Intell. Manuf.* 2020, 33. Pp. 771–784.

88. Jin, Z.; Zhang, Z.; Gu, G.X. Autonomous in-situ correction of fused deposition modeling printers using computer vision and deep learning. *Manuf. Lett.* 2019, 22. Pp. 11–15.

89. Bisheh, M.N.; Chang, S.I.; Lei, S. A layer-by-layer quality monitoring framework for 3D printing. *Comput. Ind. Eng.* 2021, 157, 107314.

90. Wu, D.; Wei, Y.; Terpenney, J. Predictive modelling of surface roughness in fused deposition modelling using data fusion. *Int. J. Prod. Res.* 2019, 57. Pp. 3992–4006.

91. Zhang, Z.; Fidan, I. Failure detection of fused filament fabrication via deep learning. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication 2019: Proceedings of the 30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive*

Manufacturing Conference, SFF, Austin, TX, USA, 12–14 August 2019. Pp. 2156–2164.

92. Nasiri, S.; Khosravani, M.R. Machine learning in predicting mechanical behavior of additively manufactured parts. *J. Mater. Res. Technol.* 2021, 14. Pp. 1137–1153.

93. Oleff, A.; Küster, B.; Stonis, M.; Overmeyer, L. Process monitoring for material extrusion additive manufacturing: A state-of-the-art review. *Prog. Addit. Manuf.* 2021, 6. Pp. 705–730.

94. Armi, L.; Fekri-Ershad, S. Texture image analysis and texture classification methods—A review. *Texture Image Anal.* 2019, 2. Pp. 1–29.

95. Arsho, Local Binary Patterns implementation using Python 3. 2017. Available online: https://github.com/arsho/local_binary_patterns.

96. Chen, B.; Wang, J.; Zhao, H.; Principe, J.C. Insights into entropy as a measure of multivariate variability. *Entropy* 2016, 18, 196.

97. Gandrillon, O.; Gaillard, M.; Espinasse, T.; Garnier, N.B.; Dussiau, C.; Kosmider, O.; Sujobert, P. Entropy as a measure of variability and stemness in single-cell transcriptomics. *Curr. Opin. Syst. Biol.* 2021, 27, 100348.

98. Fastowicz, J.; Grudziński, M.; Teclaw, M.; Okarma, K. Objective 3D printed surface quality assessment based on entropy of depth maps. *Entropy* 2019, 21, 97.

99. Rita Kol, Tobias De Somer, Dagmar R. D'hooge, Fabian Knappich, Kim Ragaert, Dimitris S. Achilias, and Steven De Meeste. State-Of-The-Art Quantification of Polymer Solution Viscosity for Plastic Waste Recycling. *ChemSusChem* 2021, 14, 4071–4102. doi.org/10.1002/cssc.202100876.

100. Романенко В.В. Голубев Л.П. (2020) Дослідження програмного забезпечення для виявлення та виправлення дефектів 3D-друку. Вісник Херсонського національного технічного університету, 3 (74), 2020 р. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2020.3.8> (фахове видання, категорія Б, ISSN 2078-4481).

101. Romanenko V., Nazarenko O. (2024) Comparative Analysis of Modern Technologies of Additive Production. *System Research in Energy*, 2(77), 84–96.

<https://doi.org/10.15407/srenergy2024.02.084>. (фахове видання, категорія Б, ISSN 2786-7102).

102. Romanenko V., Khaidurov V., Bekesheva A, Yarovoy R. (2024) Using the variational principle of leveling illumination in images. ITTAP 2024: 4th International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, October 23–25, 2024, Ternopil, Ukraine, Opole, Poland. CEUR-WS.org. (Scopus, ISSN 1613-0073). Pp. 355–366. Режим доступу: <https://ceur-ws.org/Vol-3896/paper20.pdf>.

103. Romanenko V., Kovtun S. (2024) Technology of Quality Control of Additive Manufacturing Products During Printing of Elements of Energy Complexes. *System Research in Energy*, 4(80), 84–96. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.110>. (фахове видання, категорія Б, ISSN 2786-7102).

104. Романенко В., Хайдуров В. (2024) Аналіз сучасних технологій адитивного виробництва. The 3rd International scientific and practical conference “European congress of scientific achievements”, March 25–27, 2024, Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain. 2024. 240 p. ISBN 978-84-15927-35-8. С. 82–88.

105. Романенко В. (2024) Порівняльний аналіз забезпечення контролю процесів адитивного виробництва. The 9th International scientific and practical conference “Current challenges of science and education”, May 6–8, 2024, MDPC Publishing, Berlin, Germany. 2024. 485 p. ISBN 978-3-954753-05-5. С. 254–259.

106. Romanenko V. (2024) State-of-the-art Detection of Defects in the Process of Manufacturing Objects of Serial Additive Manufacturing Based on Artificial Intelligence. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2024). Сімнадцята міжнародна науково-практична конференція, 21–22 травня 2024 р., Київ, Україна. – К.: НАУ, 2024. – 516 с.

107. Романенко В. (2024) Технологія контролю якості виробів адитивного виробництва в ході друку елементів енергетичних комплексів. II Міжнародна науково-практична конференція «Цифрові технології в енергетиці і автоматичності», 7 червня 2024 року, м. Київ. ISSN 2786-7102 (Online), ISSN 2786-7633 (Print). С. 43–45.

108. Романенко В., Заячковський В., Подніжний С. (2025) Технології і моделі змішування полімерів в екструдері принтерів. XXX Міжнародна науково-практична конференція «Перспективи розвитку сучасної науки багатoproфільного університету в контексті інтеграції в міжнародний освітній простір», 27–28 березня 2025 року, м. Київ. С. 331–336.

109. Романенко В.В., Хайдуrow В.В., Ковтун С.І. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 134762 : комп'ютерна програма «Програмний модуль вирівнювання освітленості кадрів зображень для підвищення ефективності розпізнавання дефектів 3D-друку в режимі реального часу» («PoillumEqualiz 1.0») / Інститут загальної енергетики НАН України. Зареєстр. 31 берез. 2025 р. Київ : УкрНОІВІ, 2025.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А
СВІДОЦТВО ПРО РЕЄСТРАЦІЮ АВТОРСЬКОГО ПРАВА НА ТВІР

УКРАЇНА



СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 134762

Комп'ютерна програма «Програмний модуль вирівнювання освітленості кадрів зображень для підвищення ефективності розпізнавання дефектів 3D-друку в режимі реального часу» («PoillumEqualiz 1.0»)

(вид, назва твору)

Автор (співавтори) Романенко Владислав Володимирович, Хайдуров Владислав Володимирович, Ковтун Світлана Іванівна

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності), псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать повністю Інститут загальної енергетики Національної академії наук України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності) фізичної особи / найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 31 березня 2025 р.

Директор Державної організації «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій»

 **Олена ОРЛЮК**



ДОДАТОК Б

**ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДУЛЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ВИРІВНЮВАННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ПІКСЕЛІВ У НЕРІВНОМІРНО
ОСВІТЛЕНИХ ЗОБРАЖЕННЯХ, ЩО ОТРИМУТЬСЯ У ПРОЦЕСІ
ЗД-ДРУКУ**

Лістинг Б.1 – Програмна реалізація методу Зейделя для пошуку чисельного розв'язку рівняння Пуассона

```
function U = SimpleSeidel(U)
global Ax Ay Cx Cy B D nx ny;
err = 1;
eps = 1e-4;
iter = 0;
while err > eps
    iter = iter + 1;
    if mod(iter,100) == 0
        fprintf('iter = %5d; err = %4.3e\n', iter, err);
    end
    err = 0;
    for i=2:nx+1
        for j=2:ny+1
            t = (Ax(i,j)*U(i-1,j) + Cx(i,j)*U(i+1,j) + ...
                Ay(i,j)*U(i,j-1) + Cy(i,j)*U(i,j+1) - ...
                D(i,j))/B(i,j);
            div = abs(t-U(i,j));
            if err < div
                err = div;
            end
            U(i,j) = t;
        end
    end
end
end
iter
```

Лістинг Б.2 – Програмна реалізація підмодуля вирівнювання інтенсивності (яскравості) пікселів у кадрі

```
function mInFuncDip
clear all; close all; clc;
global Ax Ay Cx Cy B D nx ny;

xa = 0; xb = 1; ya = 0; yb = 1;
Lx = xb-xa; Ly = yb-ya;
nx = 60; ny = 60;
hx = Lx / (nx+1); hy = Ly / (ny+1);
x = xa:hx:xb; y = ya:hy:yb;

[X,Y] = meshgrid(x,y);
```

```

Lambda = 1.0;
Ax = ones (nx+2,ny+2)/hx^2; Cx = Ax;
Ay = ones (nx+2,ny+2)/hy^2; Cy = Ay;
B = Ax+Cx+Ay+Cy+Lambda;
D = zeros (nx+2,ny+2);
for i=2:nx+1
    for j=2:ny+1
        D(i,j) = (f(i-1,j) - 2*f(i,j) + f(i+1,j))/hx^2+...
                (f(i,j-1) - 2*f(i,j) + f(i,j+1))/hy^2;
    end
end
U = zeros (nx+2,ny+2);
j=2:ny+1;
B(2,j) = B(2,j) - Ax(2,j);      Ax(2,j) = 0;
B(nx+1,j) = B(nx+1,j) - Cx(nx+1,j); Cx(nx+1,j)=0;

i=2:nx+1;
B(i,2) = B(i,2) - Ay(i,2);      Ay(i,2) = 0;
B(i,ny+1) = B(i,ny+1) - Cy(i,ny+1); Cy(i,ny+1) = 0;

U = SimpleSeidel(U);

U(1,j) = U(2,j); U(nx+2,j) = U(nx+1,j);
U(i,1) = U(i,2); U(i,ny+2) = U(i,ny+1);

U(1,1) = (U(1,2)+U(2,1))/2;
U(nx+2,ny+2) = (U(nx+1,ny+2) + U(nx+2,ny+1))/2;
U(1,ny+2) = (U(1,ny+1) + U(2,ny+2))/2;
U(nx+2,1) = (U(nx+1,1) + U(nx+2,2))/2;
subplot(1,2,1); surf(x,y,f');
subplot(1,2,2); surf(x,y,U');

```

Лістинг Б.3 – Програмна реалізація вирівнювання інтенсивності (яскравості) пікселів у кадрі для різних значень гіперпараметра λ у розробленій математичній моделі.

```

function U = mllInImgFuncDip(Lambda, f)
global Ax Ay Cx Cy B D nx ny;
[nx, ny] = size(f);
nx = nx - 2; ny = ny - 2;
Ax = ones (nx+2,ny+2); Cx = Ax;
Ay = ones (nx+2,ny+2); Cy = Ay;
B = Ax+Cx+Ay+Cy+Lambda;
D = zeros (nx+2,ny+2);
for i=2:nx+1
    for j=2:ny+1
        D(i,j) = (f(i-1,j) - 2*f(i,j) + f(i+1,j)) +...
                (f(i,j-1) - 2*f(i,j) + f(i,j+1));
    end
end
U = zeros (nx+2,ny+2);
j=2:ny+1;

```

```

B(2,j) = B(2,j) - Ax(2,j);      Ax(2,j) = 0;
B(nx+1,j) = B(nx+1,j) - Cx(nx+1,j);  Cx(nx+1,j)=0;

i=2:nx+1;
B(i,2) = B(i,2) - Ay(i,2);      Ay(i,2) = 0;
B(i,ny+1) = B(i,ny+1) - Cy(i,ny+1);  Cy(i,ny+1) = 0;

% Ic = round((nx+2)/2);  Jc = round((ny+2)/2);
% Ax(Ic,Jc) = 0; Ay(Ic,Jc) = 0;
% Cx(Ic,Jc) = 0; Cy(Ic,Jc) = 0;
% B (Ic,Jc) = -1;
% D (Ic,Jc) = f(Ic,Jc);

U = SimpleSeidel(U);

U(1,j) = U(2,j);  U(nx+2,j) = U(nx+1,j);
U(i,1) = U(i,2);  U(i,ny+2) = U(i,ny+1);

U(1,1) = (U(1,2)+U(2,1))/2;
U(nx+2,ny+2) = (U(nx+1,ny+2) + U(nx+2,ny+1))/2;
U(1,ny+2) = (U(1,ny+1) + U(2,ny+2))/2;
U(nx+2,1) = (U(nx+1,1) + U(nx+2,2))/2;
maxU = max(max(U)); minU = min(min(U));
U = (U-minU)/(maxU-minU);

function mainTester
clear all; close all; clc;
% f = imread("InImage.png");
% f = imread("In1.png");
% f = imread("In2.png");
% f = imread("In3.png");
% f = imread("In4.png");
f = imread("In5.png");
f = rgb2gray(f); f = double(f)/255;
maxf = max(max(f)); minf = min(min(f));
f = (f-minf)/(maxf-minf);
LamArray = [0 0.001 0.005 0.01 0.05 0.1 0.2 0.5];
for LAB = LamArray
    U = mllInImgFuncDip(LAB,f);
    figure;
    subplot(1,2,1); imshow(f);
    subplot(1,2,2); imshow(U);
    s = strcat('\lambda = ',num2str(Lam));
    title(s);
    imwrite(U,strcat('\lam_',num2str(Lam),'.png'));
    pause(1e-5);
end

```

ДОДАТОК В

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДУЛЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

АНАЛІЗУ Й ВІЗУАЛІЗАЦІЇ РОЗРИВУ ВИГОТОВЛЕНИХ

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ЗРАЗКІВ ЗАСОБАМИ АДИТИВНОГО

ВИРОБНИЦТВА

Лістинг В.1 – Головний програмний модуль для візуалізації результатів дослідження експериментальних зразків на розтяг

```
function main
close all; clear cll; clc;
file = {'ABS.xlsx';
        'ABS_CF10.xlsx';
        'ABS+.xlsx';
        'NEYLON_CF10.xlsx';
        'NEYLON_PA6.xlsx';
        'PCTG.xlsx';
        'PETG_CF10';
        'PLA';
        'PLA_CF10';
        'FLEX_90'};
N = length(file);

for i = 1:N
    ReadDataFromFile(char(file(i)), i);
end
```

```
function ReadDataFromFile(file,Block)
Data = xlsread(file,1); plotData(Data,Block,file);
Data = xlsread(file,2); plotData(Data,Block,file);
Data = xlsread(file,3); plotData(Data,Block,file);
```

Лістинг В.2 – Візуалізація графічних результатів дослідження експериментальних зразків на розтяг

```
function plotData(Data, Block, tit)
Sec = Data(:,1); N = Data(:,2); mm = Data(:,3);
N_mm2 = Data(:,4); Percent = Data(:,5);

figure(Block*2); grid on; hold on;
plot(Percent,N_mm2,'LineWidth',3);
title(tit); xlabel('Percent, %'); ylabel('N/mm^{2}');
```

ДОДАТОК Г

ПРАКТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТЕСТУВАНЬ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ

ХАРАКТЕРИСТИК ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ЗРАЗКІВ НА РОЗРИВНІЙ

МАШИНІ

Таблиця Г.1 – ABS 1 зразок

Time, Sec	Strength, N	Strain, mm	Strength, MPA	Strain, %	Time, Sec	Strength, N	Strain, mm	Strength, MPA	Strain, %
0,000	0,013	0,003	0,001	0,004	53,100	822,317	4,428	33,118	4,976
0,100	0,335	0,012	0,014	0,013	53,200	822,082	4,437	33,108	4,985
0,200	3,297	0,020	0,133	0,023	53,300	821,845	4,445	33,099	4,995
0,300	8,055	0,028	0,324	0,032	53,400	821,625	4,453	33,090	5,004
0,400	12,913	0,037	0,520	0,041	53,500	821,403	4,462	33,081	5,013
0,500	17,808	0,045	0,717	0,051	53,600	821,176	4,470	33,072	5,023
0,600	22,717	0,053	0,915	0,060	53,700	820,929	4,478	33,062	5,032
0,700	27,623	0,062	1,112	0,069	53,800	820,667	4,487	33,051	5,041
0,800	32,503	0,070	1,309	0,079	53,900	820,411	4,495	33,041	5,051
0,900	37,389	0,078	1,506	0,088	54,000	820,146	4,503	33,030	5,060
1,000	42,219	0,087	1,700	0,098	54,100	819,844	4,512	33,018	5,069
1,100	47,069	0,095	1,896	0,107	54,200	819,553	4,520	33,007	5,079
1,200	51,939	0,103	2,092	0,116	54,300	819,241	4,528	32,994	5,088
1,300	56,794	0,112	2,287	0,126	54,400	818,971	4,537	32,983	5,097
1,400	61,609	0,120	2,481	0,135	54,500	818,688	4,545	32,972	5,107
1,500	66,368	0,128	2,673	0,144	54,600	818,407	4,553	32,960	5,116
1,600	71,087	0,137	2,863	0,154	54,700	818,140	4,562	32,950	5,126
1,700	75,777	0,145	3,052	0,163	54,800	817,885	4,570	32,939	5,135
1,800	80,406	0,153	3,238	0,172	54,900	817,645	4,578	32,930	5,144
1,900	85,049	0,162	3,425	0,182	55,000	817,412	4,587	32,920	5,154
2,000	89,693	0,170	3,612	0,191	55,100	817,188	4,595	32,911	5,163
2,100	94,345	0,178	3,800	0,201	55,200	816,959	4,603	32,902	5,172
2,200	98,976	0,187	3,986	0,210	55,300	816,771	4,612	32,895	5,182
2,300	103,623	0,195	4,173	0,219	55,400	816,608	4,620	32,888	5,191
2,400	108,279	0,203	4,361	0,229	55,500	816,406	4,628	32,880	5,201
2,500	112,955	0,212	4,549	0,238	55,600	816,178	4,637	32,871	5,210
2,600	117,648	0,220	4,738	0,247	55,700	815,948	4,645	32,861	5,219
2,700	122,368	0,228	4,928	0,257	55,800	815,709	4,653	32,852	5,229
2,800	127,095	0,237	5,119	0,266	55,900	815,477	4,662	32,842	5,238
2,900	131,815	0,245	5,309	0,275	56,000	815,268	4,670	32,834	5,247
3,000	136,506	0,253	5,498	0,285	56,100	815,044	4,678	32,825	5,257
3,100	141,180	0,262	5,686	0,294	56,200	814,805	4,687	32,815	5,266
3,200	145,852	0,270	5,874	0,304	56,300	814,563	4,695	32,806	5,275
3,300	150,456	0,278	6,059	0,313	56,400	814,287	4,703	32,794	5,285
3,400	155,077	0,287	6,246	0,322	56,500	814,034	4,712	32,784	5,294
3,500	159,659	0,295	6,430	0,332	56,600	813,802	4,720	32,775	5,304
3,600	164,188	0,303	6,612	0,341	56,700	813,575	4,728	32,766	5,313
3,700	168,729	0,312	6,795	0,350	56,800	813,336	4,737	32,756	5,322
3,800	173,268	0,320	6,978	0,360	56,900	813,063	4,745	32,745	5,332
3,900	177,736	0,328	7,158	0,369	57,000	812,825	4,753	32,736	5,341
4,000	182,188	0,337	7,337	0,378	57,100	812,573	4,762	32,725	5,350

Таблица Г.2 – ABS 2 зразок

Time, Sec	Strength, N	Strain, mm	Strength, MPA	Strain, %	Time, Sec	Strength, N	Strain, mm	Strength, MPA	Strain, %
0,000	-0,146	0,003	-0,006	0,004	44,000	769,099	3,670	30,813	4,124
0,100	-0,016	0,012	-0,001	0,013	44,100	768,784	3,678	30,801	4,133
0,200	1,739	0,020	0,070	0,023	44,200	768,480	3,687	30,788	4,142
0,300	5,754	0,028	0,231	0,032	44,300	768,191	3,695	30,777	4,152
0,400	10,072	0,037	0,404	0,041	44,400	767,900	3,703	30,765	4,161
0,500	14,337	0,045	0,574	0,051	44,500	767,598	3,712	30,753	4,171
0,600	18,481	0,053	0,740	0,060	44,600	767,334	3,720	30,743	4,180
0,700	22,662	0,062	0,908	0,069	44,700	767,024	3,728	30,730	4,189
0,800	26,871	0,070	1,077	0,079	44,800	766,707	3,737	30,717	4,199
0,900	31,153	0,078	1,248	0,088	44,900	766,368	3,745	30,704	4,208
1,000	35,486	0,087	1,422	0,097	45,000	766,039	3,753	30,691	4,217
1,100	39,790	0,095	1,594	0,107	45,100	765,684	3,762	30,676	4,227
1,200	44,141	0,103	1,768	0,116	45,200	765,327	3,770	30,662	4,236
1,300	48,510	0,112	1,944	0,126	45,300	764,971	3,778	30,648	4,245
1,400	52,851	0,120	2,117	0,135	45,400	764,594	3,787	30,633	4,255
1,500	57,168	0,128	2,290	0,144	45,500	764,221	3,795	30,618	4,264
1,600	61,485	0,137	2,463	0,154	45,600	763,858	3,803	30,603	4,274
1,700	65,807	0,145	2,636	0,163	45,700	763,483	3,812	30,588	4,283
1,800	70,167	0,153	2,811	0,172	45,800	763,130	3,820	30,574	4,292
1,900	74,504	0,162	2,985	0,182	45,900	762,768	3,828	30,560	4,302
2,000	78,850	0,170	3,159	0,191	46,000	762,437	3,837	30,546	4,311
2,100	83,210	0,178	3,334	0,200	46,100	762,150	3,845	30,535	4,320
2,200	87,508	0,187	3,506	0,210	46,200	761,760	3,853	30,519	4,330
2,300	91,810	0,195	3,678	0,219	46,300	761,374	3,862	30,504	4,339
2,400	96,127	0,203	3,851	0,229	46,400	760,977	3,870	30,488	4,348
2,500	100,433	0,212	4,024	0,238	46,500	760,546	3,878	30,471	4,358
2,600	104,706	0,220	4,195	0,247	46,600	760,118	3,887	30,453	4,367
2,700	108,935	0,228	4,364	0,257	46,700	759,640	3,895	30,434	4,377
2,800	113,154	0,237	4,533	0,266	46,800	759,201	3,903	30,417	4,386
2,900	117,332	0,245	4,701	0,275	46,900	758,791	3,912	30,400	4,395
3,000	121,454	0,253	4,866	0,285	47,000	758,371	3,920	30,383	4,405
3,100	125,572	0,262	5,031	0,294	47,100	757,957	3,928	30,367	4,414
3,200	129,663	0,270	5,195	0,303	47,200	757,570	3,937	30,351	4,423
3,300	133,724	0,278	5,358	0,313	47,300	757,146	3,945	30,334	4,433
3,400	137,796	0,287	5,521	0,322	47,400	756,702	3,953	30,317	4,442
3,500	141,891	0,295	5,685	0,332	47,500	756,242	3,962	30,298	4,451
3,600	145,968	0,303	5,848	0,341	47,600	755,787	3,970	30,280	4,461
3,700	150,054	0,312	6,012	0,350	47,700	755,291	3,978	30,260	4,470
3,800	154,182	0,320	6,177	0,360	47,800	754,736	3,987	30,238	4,480
3,900	158,283	0,328	6,341	0,369	47,900	754,116	3,995	30,213	4,489
4,000	162,427	0,337	6,507	0,378	48,000	753,428	4,003	30,185	4,498

Таблиця Г.3 – ABS 3 зразок

Time, Sec	Strength, N	Strain, mm	Strength, MPA	Strain, %	Time, Sec	Strength, N	Strain, mm	Strength, MPA	Strain, %
0,000	-0,075	0,003	-0,003	0,004	38,100	826,675	3,178	32,279	3,532
0,100	0,227	0,012	0,009	0,013	38,200	826,149	3,187	32,259	3,541
0,200	2,877	0,020	0,112	0,022	38,300	825,580	3,195	32,237	3,550
0,300	7,116	0,028	0,278	0,032	38,400	825,006	3,203	32,214	3,559
0,400	11,237	0,037	0,439	0,041	38,500	824,397	3,212	32,190	3,569
0,500	15,113	0,045	0,590	0,050	38,600	823,789	3,220	32,167	3,578
0,600	18,992	0,053	0,742	0,059	38,700	823,201	3,228	32,144	3,587
0,700	23,174	0,062	0,905	0,069	38,800	822,616	3,237	32,121	3,596
0,800	27,404	0,070	1,070	0,078	38,900	821,991	3,245	32,096	3,606
0,900	31,578	0,078	1,233	0,087	39,000	821,390	3,253	32,073	3,615
1,000	35,796	0,087	1,398	0,096	39,100	820,762	3,262	32,049	3,624
1,100	40,030	0,095	1,563	0,106	39,200	820,133	3,270	32,024	3,633
1,200	44,249	0,103	1,728	0,115	39,300	819,545	3,278	32,001	3,643
1,300	48,478	0,112	1,893	0,124	39,400	818,979	3,287	31,979	3,652
1,400	52,706	0,120	2,058	0,133	39,500	818,423	3,295	31,957	3,661
1,500	56,934	0,128	2,223	0,143	39,600	817,841	3,303	31,934	3,671
1,600	61,151	0,137	2,388	0,152	39,700	817,232	3,312	31,911	3,680
1,700	65,368	0,145	2,552	0,161	39,800	816,623	3,320	31,887	3,689
1,800	69,598	0,153	2,718	0,171	39,900	816,023	3,328	31,863	3,698
1,900	73,864	0,162	2,884	0,180	40,000	815,390	3,337	31,839	3,708
2,000	78,130	0,170	3,051	0,189	40,100	814,789	3,345	31,815	3,717
2,100	82,363	0,178	3,216	0,198	40,200	814,220	3,353	31,793	3,726
2,200	86,584	0,187	3,381	0,208	40,300	813,651	3,362	31,771	3,735
2,300	90,814	0,195	3,546	0,217	40,400	813,063	3,370	31,748	3,745
2,400	95,018	0,203	3,710	0,226	40,500	812,481	3,378	31,725	3,754
2,500	99,219	0,212	3,874	0,235	40,600	811,877	3,387	31,702	3,763
2,600	103,388	0,220	4,037	0,245	40,700	811,253	3,395	31,677	3,772
2,700	107,595	0,228	4,201	0,254	40,800	810,628	3,403	31,653	3,782
2,800	111,780	0,237	4,365	0,263	40,900	809,954	3,412	31,626	3,791
2,900	115,933	0,245	4,527	0,272	41,000	809,307	3,420	31,601	3,800
3,000	120,080	0,253	4,689	0,282	41,100	808,593	3,428	31,573	3,809
3,100	124,227	0,262	4,851	0,291	41,200	807,775	3,437	31,541	3,819
3,200	128,304	0,270	5,010	0,300	41,300	806,939	3,445	31,509	3,828
3,300	132,388	0,278	5,169	0,309	41,400	806,095	3,453	31,476	3,837
3,400	136,487	0,287	5,329	0,319	41,500	805,219	3,462	31,442	3,846
3,500	140,572	0,295	5,489	0,328	41,600	804,289	3,470	31,405	3,856
3,600	144,595	0,303	5,646	0,337	41,700	803,329	3,478	31,368	3,865
3,700	148,606	0,312	5,803	0,346	41,800	802,288	3,487	31,327	3,874
3,800	152,539	0,320	5,956	0,356	41,900	801,042	3,495	31,278	3,883
3,900	156,452	0,328	6,109	0,365	42,000	799,545	3,503	31,220	3,893
4,000	160,360	0,337	6,262	0,374	42,100	797,652	3,512	31,146	3,902

Таблиця Г.4 – ABS CF10 1 зразок

Time, Sec	Strength, N	Strain, mm	Strength, MPA	Strain, %	Time, Sec	Strength, N	Strain, mm	Strength, MPA	Strain, %
0,000	0,013	0,003	0,000	0,004	38,100	1109,053	3,178	38,086	3,532
0,100	0,168	0,012	0,006	0,013	38,200	1109,133	3,187	38,088	3,541
0,200	2,289	0,020	0,079	0,022	38,300	1109,228	3,195	38,092	3,550
0,300	6,525	0,028	0,224	0,032	38,400	1109,301	3,203	38,094	3,559
0,400	10,368	0,037	0,356	0,041	38,500	1109,395	3,212	38,097	3,569
0,500	13,849	0,045	0,476	0,050	38,600	1109,459	3,220	38,100	3,578
0,600	18,125	0,053	0,622	0,059	38,700	1109,505	3,228	38,101	3,587
0,700	23,158	0,062	0,795	0,069	38,800	1109,584	3,237	38,104	3,596
0,800	28,316	0,070	0,972	0,078	38,900	1109,667	3,245	38,107	3,606
0,900	33,456	0,078	1,149	0,087	39,000	1109,695	3,253	38,108	3,615
1,000	38,622	0,087	1,326	0,096	39,100	1109,722	3,262	38,109	3,624
1,100	43,818	0,095	1,505	0,106	39,200	1109,688	3,270	38,107	3,633
1,200	49,055	0,103	1,685	0,115	39,300	1109,630	3,278	38,105	3,643
1,300	54,364	0,112	1,867	0,124	39,400	1109,543	3,287	38,102	3,652
1,400	59,673	0,120	2,049	0,133	39,500	1109,444	3,295	38,099	3,661
1,500	64,993	0,128	2,232	0,143	39,600	1109,357	3,303	38,096	3,670
1,600	70,275	0,137	2,413	0,152	39,700	1109,254	3,312	38,093	3,680
1,700	75,515	0,145	2,593	0,161	39,800	1109,098	3,320	38,087	3,689
1,800	80,744	0,153	2,773	0,170	39,900	1108,923	3,328	38,081	3,698
1,900	85,998	0,162	2,953	0,180	40,000	1108,739	3,337	38,075	3,708
2,000	91,232	0,170	3,133	0,189	40,100	1108,548	3,345	38,068	3,717
2,100	96,447	0,178	3,312	0,198	40,200	1108,322	3,353	38,061	3,726
2,200	101,684	0,187	3,492	0,208	40,300	1108,108	3,362	38,053	3,735
2,300	106,913	0,195	3,671	0,217	40,400	1107,877	3,370	38,045	3,745
2,400	112,092	0,203	3,849	0,226	40,500	1107,573	3,378	38,035	3,754
2,500	117,229	0,212	4,026	0,235	40,600	1107,224	3,387	38,023	3,763
2,600	122,387	0,220	4,203	0,245	40,700	1106,842	3,395	38,010	3,772
2,700	127,527	0,228	4,379	0,254	40,800	1106,443	3,403	37,996	3,782
2,800	132,653	0,237	4,555	0,263	40,900	1106,049	3,412	37,982	3,791
2,900	137,720	0,245	4,729	0,272	41,000	1105,634	3,420	37,968	3,800
3,000	142,789	0,253	4,903	0,282	41,100	1105,231	3,428	37,954	3,809
3,100	147,767	0,262	5,074	0,291	41,200	1104,800	3,437	37,940	3,819
3,200	152,717	0,270	5,244	0,300	41,300	1104,363	3,445	37,925	3,828
3,300	157,723	0,278	5,416	0,309	41,400	1103,911	3,453	37,909	3,837
3,400	162,733	0,287	5,588	0,319	41,500	1103,438	3,462	37,893	3,846
3,500	167,720	0,295	5,760	0,328	41,600	1102,929	3,470	37,875	3,856
3,600	172,706	0,303	5,931	0,337	41,700	1102,395	3,478	37,857	3,865
3,700	177,781	0,312	6,105	0,346	41,800	1101,786	3,487	37,836	3,874
3,800	182,838	0,320	6,279	0,356	41,900	1101,066	3,495	37,811	3,883
3,900	187,901	0,328	6,453	0,365	42,000	1100,198	3,503	37,782	3,893
4,000	192,954	0,337	6,626	0,374	42,100	1099,070	3,512	37,743	3,902

Таблиця Г.5 – ABS_CF10 2 зразок

Time, Sec	Strength, N	Strain, mm	Strength, MPA	Strain, %	Time, Sec	Strength, N	Strain, mm	Strength, MPA	Strain, %
0,000	0,013	0,003	0,000	0,004	38,000	1108,944	3,170	38,082	3,522
0,100	0,168	0,012	0,006	0,013	38,100	1109,053	3,178	38,086	3,532
0,200	2,289	0,020	0,079	0,022	38,200	1109,133	3,187	38,088	3,541
0,300	6,525	0,028	0,224	0,032	38,300	1109,228	3,195	38,092	3,550
0,400	10,368	0,037	0,356	0,041	38,400	1109,301	3,203	38,094	3,559
0,500	13,849	0,045	0,476	0,050	38,500	1109,395	3,212	38,097	3,569
0,600	18,125	0,053	0,622	0,059	38,600	1109,459	3,220	38,100	3,578
0,700	23,158	0,062	0,795	0,069	38,700	1109,505	3,228	38,101	3,587
0,800	28,316	0,070	0,972	0,078	38,800	1109,584	3,237	38,104	3,596
0,900	33,456	0,078	1,149	0,087	38,900	1109,667	3,245	38,107	3,606
1,000	38,622	0,087	1,326	0,096	39,000	1109,695	3,253	38,108	3,615
1,100	43,818	0,095	1,505	0,106	39,100	1109,722	3,262	38,109	3,624
1,200	49,055	0,103	1,685	0,115	39,200	1109,688	3,270	38,107	3,633
1,300	54,364	0,112	1,867	0,124	39,300	1109,630	3,278	38,105	3,643
1,400	59,673	0,120	2,049	0,133	39,400	1109,543	3,287	38,102	3,652
1,500	64,993	0,128	2,232	0,143	39,500	1109,444	3,295	38,099	3,661
1,600	70,275	0,137	2,413	0,152	39,600	1109,357	3,303	38,096	3,670
1,700	75,515	0,145	2,593	0,161	39,700	1109,254	3,312	38,093	3,680
1,800	80,744	0,153	2,773	0,170	39,800	1109,098	3,320	38,087	3,689
1,900	85,998	0,162	2,953	0,180	39,900	1108,923	3,328	38,081	3,698
2,000	91,232	0,170	3,133	0,189	40,000	1108,739	3,337	38,075	3,708
2,100	96,447	0,178	3,312	0,198	40,100	1108,548	3,345	38,068	3,717
2,200	101,684	0,187	3,492	0,208	40,200	1108,322	3,353	38,061	3,726
2,300	106,913	0,195	3,671	0,217	40,300	1108,108	3,362	38,053	3,735
2,400	112,092	0,203	3,849	0,226	40,400	1107,877	3,370	38,045	3,745
2,500	117,229	0,212	4,026	0,235	40,500	1107,573	3,378	38,035	3,754
2,600	122,387	0,220	4,203	0,245	40,600	1107,224	3,387	38,023	3,763
2,700	127,527	0,228	4,379	0,254	40,700	1106,842	3,395	38,010	3,772
2,800	132,653	0,237	4,555	0,263	40,800	1106,443	3,403	37,996	3,782
2,900	137,720	0,245	4,729	0,272	40,900	1106,049	3,412	37,982	3,791
3,000	142,789	0,253	4,903	0,282	41,000	1105,634	3,420	37,968	3,800
3,100	147,767	0,262	5,074	0,291	41,100	1105,231	3,428	37,954	3,809
3,200	152,717	0,270	5,244	0,300	41,200	1104,800	3,437	37,940	3,819
3,300	157,723	0,278	5,416	0,309	41,300	1104,363	3,445	37,925	3,828
3,400	162,733	0,287	5,588	0,319	41,400	1103,911	3,453	37,909	3,837
3,500	167,720	0,295	5,760	0,328	41,500	1103,438	3,462	37,893	3,846
3,600	172,706	0,303	5,931	0,337	41,600	1102,929	3,470	37,875	3,856
3,700	177,781	0,312	6,105	0,346	41,700	1102,395	3,478	37,857	3,865
3,800	182,838	0,320	6,279	0,356	41,800	1101,786	3,487	37,836	3,874
3,900	187,901	0,328	6,453	0,365	41,900	1101,066	3,495	37,811	3,883
4,000	192,954	0,337	6,626	0,374	42,000	1100,198	3,503	37,782	3,893

Таблиця Г.6 – ABS CF10 3 зразок

Time, Sec	Strength, N	Strain, mm	Strength, MPA	Strain, %	Time, Sec	Strength, N	Strain, mm	Strength, MPA	Strain, %
0,000	-0,086	0,003	-0,003	0,004	38,000	1069,202	3,170	37,804	3,522
0,100	0,084	0,012	0,003	0,013	38,100	1068,746	3,178	37,788	3,532
0,200	2,114	0,020	0,075	0,022	38,200	1068,252	3,187	37,771	3,541
0,300	6,992	0,028	0,247	0,032	38,300	1067,731	3,195	37,752	3,550
0,400	12,317	0,037	0,435	0,041	38,400	1067,206	3,203	37,734	3,559
0,500	17,646	0,045	0,624	0,050	38,500	1066,696	3,212	37,716	3,569
0,600	22,963	0,053	0,812	0,059	38,600	1066,216	3,220	37,699	3,578
0,700	28,299	0,062	1,001	0,069	38,700	1065,785	3,228	37,684	3,587
0,800	33,603	0,070	1,188	0,078	38,800	1065,346	3,237	37,668	3,596
0,900	38,943	0,078	1,377	0,087	38,900	1064,922	3,245	37,653	3,606
1,000	44,284	0,087	1,566	0,096	39,000	1064,501	3,253	37,638	3,615
1,100	49,669	0,095	1,756	0,106	39,100	1064,123	3,262	37,625	3,624
1,200	55,037	0,103	1,946	0,115	39,200	1063,760	3,270	37,612	3,633
1,300	60,469	0,112	2,138	0,124	39,300	1063,417	3,278	37,600	3,643
1,400	65,905	0,120	2,330	0,133	39,400	1063,072	3,287	37,588	3,652
1,500	71,370	0,128	2,523	0,143	39,500	1062,725	3,295	37,575	3,661
1,600	76,841	0,137	2,717	0,152	39,600	1062,368	3,303	37,563	3,670
1,700	82,308	0,145	2,910	0,161	39,700	1062,012	3,312	37,550	3,680
1,800	87,808	0,153	3,105	0,170	39,800	1061,570	3,320	37,535	3,689
1,900	93,373	0,162	3,301	0,180	39,900	1061,117	3,328	37,518	3,698
2,000	98,888	0,170	3,496	0,189	40,000	1060,672	3,337	37,503	3,708
2,100	104,346	0,178	3,689	0,198	40,100	1060,177	3,345	37,485	3,717
2,200	109,766	0,187	3,881	0,208	40,200	1059,732	3,353	37,470	3,726
2,300	115,139	0,195	4,071	0,217	40,300	1059,291	3,362	37,454	3,735
2,400	120,457	0,203	4,259	0,226	40,400	1058,861	3,370	37,439	3,745
2,500	125,758	0,212	4,446	0,235	40,500	1058,410	3,378	37,423	3,754
2,600	131,081	0,220	4,635	0,245	40,600	1057,984	3,387	37,408	3,763
2,700	136,363	0,228	4,821	0,254	40,700	1057,560	3,395	37,393	3,772
2,800	141,619	0,237	5,007	0,263	40,800	1057,153	3,403	37,378	3,782
2,900	146,867	0,245	5,193	0,272	40,900	1056,768	3,412	37,365	3,791
3,000	152,125	0,253	5,379	0,282	41,000	1056,374	3,420	37,351	3,800
3,100	157,353	0,262	5,564	0,291	41,100	1055,988	3,428	37,337	3,809
3,200	162,582	0,270	5,749	0,300	41,200	1055,609	3,437	37,324	3,819
3,300	167,832	0,278	5,934	0,309	41,300	1055,203	3,445	37,309	3,828
3,400	173,094	0,287	6,120	0,319	41,400	1054,783	3,453	37,295	3,837
3,500	178,334	0,295	6,305	0,328	41,500	1054,403	3,462	37,281	3,846
3,600	183,587	0,303	6,491	0,337	41,600	1054,021	3,470	37,268	3,856
3,700	188,788	0,312	6,675	0,346	41,700	1053,643	3,478	37,254	3,865
3,800	193,973	0,320	6,858	0,356	41,800	1053,282	3,487	37,241	3,874
3,900	199,143	0,328	7,041	0,365	41,900	1052,960	3,495	37,230	3,883
4,000	204,299	0,337	7,224	0,374	42,000	1052,661	3,503	37,220	3,893

Таблиця Г.7 – ABS+ 1 зразок

Time, Sec	Strength, N	Strain, mm	Strength, MPA	Strain, %	Time, Sec	Strength, N	Strain, mm	Strength, MPA	Strain, %
0,000	0,068	0,003	0,003	0,004	37,000	1094,017	3,087	40,852	3,430
0,100	0,275	0,012	0,010	0,013	37,100	1092,407	3,095	40,792	3,439
0,200	2,584	0,020	0,097	0,022	37,200	1090,787	3,103	40,731	3,448
0,300	7,653	0,028	0,286	0,032	37,300	1089,195	3,112	40,672	3,458
0,400	13,186	0,037	0,492	0,041	37,400	1087,572	3,120	40,611	3,467
0,500	18,765	0,045	0,701	0,050	37,500	1085,987	3,128	40,552	3,476
0,600	24,387	0,053	0,911	0,059	37,600	1084,425	3,137	40,494	3,485
0,700	29,991	0,062	1,120	0,069	37,700	1082,897	3,145	40,437	3,495
0,800	35,553	0,070	1,328	0,078	37,800	1081,405	3,153	40,381	3,504
0,900	41,116	0,078	1,535	0,087	37,900	1079,947	3,162	40,327	3,513
1,000	46,628	0,087	1,741	0,096	38,000	1078,494	3,170	40,272	3,522
1,100	52,155	0,095	1,948	0,106	38,100	1077,056	3,178	40,219	3,532
1,200	57,666	0,103	2,153	0,115	38,200	1075,632	3,187	40,165	3,541
1,300	63,198	0,112	2,360	0,124	38,300	1074,266	3,195	40,115	3,550
1,400	68,746	0,120	2,567	0,133	38,400	1072,869	3,203	40,062	3,559
1,500	74,280	0,128	2,774	0,143	38,500	1071,483	3,212	40,011	3,569
1,600	79,765	0,137	2,979	0,152	38,600	1070,113	3,220	39,959	3,578
1,700	85,204	0,145	3,182	0,161	38,700	1068,753	3,228	39,909	3,587
1,800	90,663	0,153	3,385	0,171	38,800	1067,422	3,237	39,859	3,596
1,900	96,116	0,162	3,589	0,180	38,900	1066,171	3,245	39,812	3,606
2,000	101,566	0,170	3,793	0,189	39,000	1064,881	3,253	39,764	3,615
2,100	107,029	0,178	3,997	0,198	39,100	1063,600	3,262	39,716	3,624
2,200	112,384	0,187	4,197	0,208	39,200	1062,334	3,270	39,669	3,633
2,300	117,739	0,195	4,397	0,217	39,300	1061,087	3,278	39,622	3,643
2,400	123,057	0,203	4,595	0,226	39,400	1059,826	3,287	39,575	3,652
2,500	128,373	0,212	4,794	0,235	39,500	1058,642	3,295	39,531	3,661
2,600	133,702	0,220	4,993	0,245	39,600	1057,488	3,303	39,488	3,671
2,700	138,987	0,228	5,190	0,254	39,700	1056,299	3,312	39,444	3,680
2,800	144,310	0,237	5,389	0,263	39,800	1055,075	3,320	39,398	3,689
2,900	149,679	0,245	5,589	0,272	39,900	1053,853	3,328	39,352	3,698
3,000	155,055	0,253	5,790	0,282	40,000	1052,631	3,337	39,307	3,708
3,100	160,405	0,262	5,990	0,291	40,100	1051,405	3,345	39,261	3,717
3,200	165,804	0,270	6,191	0,300	40,200	1050,180	3,353	39,215	3,726
3,300	171,199	0,278	6,393	0,309	40,300	1048,953	3,362	39,169	3,735
3,400	176,544	0,287	6,592	0,319	40,400	1047,746	3,370	39,124	3,745
3,500	181,971	0,295	6,795	0,328	40,500	1046,488	3,378	39,077	3,754
3,600	187,378	0,303	6,997	0,337	40,600	1045,151	3,387	39,027	3,763
3,700	192,736	0,312	7,197	0,346	40,700	1043,733	3,395	38,974	3,772
3,800	198,037	0,320	7,395	0,356	40,800	1042,352	3,403	38,923	3,782
3,900	203,319	0,328	7,592	0,365	40,900	1040,912	3,412	38,869	3,791
4,000	208,502	0,337	7,786	0,374	41,000	1039,357	3,420	38,811	3,800

Таблиця Г.8 – ABS+ 2 зразок

Time, Sec	Strength, N	Strain, mm	Strength, MPA	Strain, %	Time, Sec	Strength, N	Strain, mm	Strength, MPA	Strain, %
0,000	0,078	0,003	0,003	0,004	31,000	1017,011	2,587	36,902	2,843
0,100	0,245	0,012	0,009	0,013	31,100	1019,392	2,595	36,988	2,852
0,200	2,549	0,020	0,093	0,022	31,200	1021,725	2,603	37,073	2,861
0,300	7,529	0,028	0,273	0,031	31,300	1024,014	2,612	37,156	2,870
0,400	12,813	0,037	0,465	0,040	31,400	1026,281	2,620	37,238	2,879
0,500	18,099	0,045	0,657	0,050	31,500	1028,541	2,628	37,320	2,888
0,600	23,406	0,053	0,849	0,059	31,600	1030,734	2,637	37,400	2,898
0,700	28,682	0,062	1,041	0,068	31,700	1032,948	2,645	37,480	2,907
0,800	33,973	0,070	1,233	0,077	31,800	1035,134	2,653	37,559	2,916
0,900	39,221	0,078	1,423	0,086	31,900	1037,340	2,662	37,639	2,925
1,000	44,516	0,087	1,615	0,095	32,000	1039,545	2,670	37,719	2,934
1,100	49,807	0,095	1,807	0,105	32,100	1041,743	2,678	37,799	2,943
1,200	54,997	0,103	1,996	0,114	32,200	1043,968	2,687	37,880	2,952
1,300	60,094	0,112	2,180	0,123	32,300	1046,127	2,695	37,958	2,962
1,400	65,198	0,120	2,366	0,132	32,400	1048,304	2,703	38,037	2,971
1,500	70,230	0,128	2,548	0,141	32,500	1050,506	2,712	38,117	2,980
1,600	75,262	0,137	2,731	0,150	32,600	1052,712	2,720	38,197	2,989
1,700	80,298	0,145	2,914	0,159	32,700	1054,865	2,728	38,275	2,998
1,800	85,338	0,153	3,096	0,169	32,800	1056,995	2,737	38,353	3,007
1,900	90,370	0,162	3,279	0,178	32,900	1059,130	2,745	38,430	3,017
2,000	95,364	0,170	3,460	0,187	33,000	1061,250	2,753	38,507	3,026
2,100	100,371	0,178	3,642	0,196	33,100	1063,329	2,762	38,582	3,035
2,200	105,405	0,187	3,825	0,205	33,200	1065,359	2,770	38,656	3,044
2,300	110,464	0,195	4,008	0,214	33,300	1067,351	2,778	38,728	3,053
2,400	115,512	0,203	4,191	0,224	33,400	1069,344	2,787	38,801	3,062
2,500	120,581	0,212	4,375	0,233	33,500	1071,259	2,795	38,870	3,072
2,600	125,661	0,220	4,560	0,242	33,600	1073,151	2,803	38,939	3,081
2,700	130,701	0,228	4,742	0,251	33,700	1074,975	2,812	39,005	3,090
2,800	135,722	0,237	4,925	0,260	33,800	1076,754	2,820	39,069	3,099
2,900	140,731	0,245	5,106	0,269	33,900	1078,445	2,828	39,131	3,108
3,000	145,715	0,253	5,287	0,278	34,000	1080,141	2,837	39,192	3,117
3,100	150,660	0,262	5,467	0,288	34,100	1081,786	2,845	39,252	3,126
3,200	155,592	0,270	5,646	0,297	34,200	1083,310	2,853	39,307	3,136
3,300	160,508	0,278	5,824	0,306	34,300	1084,717	2,862	39,358	3,145
3,400	165,385	0,287	6,001	0,315	34,400	1086,014	2,870	39,405	3,154
3,500	170,204	0,295	6,176	0,324	34,500	1087,184	2,878	39,448	3,163
3,600	174,993	0,303	6,350	0,333	34,600	1088,266	2,887	39,487	3,172
3,700	179,690	0,312	6,520	0,343	34,700	1089,274	2,895	39,524	3,181
3,800	184,325	0,320	6,688	0,352	34,800	1090,207	2,903	39,558	3,191
3,900	188,899	0,328	6,854	0,361	34,900	1091,038	2,912	39,588	3,200
4,000	193,402	0,337	7,017	0,370	35,000	1091,735	2,920	39,613	3,209

Таблиця Г.9 – ABS+ 3 зразок

Time, Sec	Strength, N	Strain, mm	Strength, MPA	Strain, %	Time, Sec	Strength, N	Strain, mm	Strength, MPA	Strain, %
0,000	0,078	0,003	0,003	0,004	31,000	1017,011	2,587	36,902	2,843
0,100	0,245	0,012	0,009	0,013	31,100	1019,392	2,595	36,988	2,852
0,200	2,549	0,020	0,093	0,022	31,200	1021,725	2,603	37,073	2,861
0,300	7,529	0,028	0,273	0,031	31,300	1024,014	2,612	37,156	2,870
0,400	12,813	0,037	0,465	0,040	31,400	1026,281	2,620	37,238	2,879
0,500	18,099	0,045	0,657	0,050	31,500	1028,541	2,628	37,320	2,888
0,600	23,406	0,053	0,849	0,059	31,600	1030,734	2,637	37,400	2,898
0,700	28,682	0,062	1,041	0,068	31,700	1032,948	2,645	37,480	2,907
0,800	33,973	0,070	1,233	0,077	31,800	1035,134	2,653	37,559	2,916
0,900	39,221	0,078	1,423	0,086	31,900	1037,340	2,662	37,639	2,925
1,000	44,516	0,087	1,615	0,095	32,000	1039,545	2,670	37,719	2,934
1,100	49,807	0,095	1,807	0,105	32,100	1041,743	2,678	37,799	2,943
1,200	54,997	0,103	1,996	0,114	32,200	1043,968	2,687	37,880	2,952
1,300	60,094	0,112	2,180	0,123	32,300	1046,127	2,695	37,958	2,962
1,400	65,198	0,120	2,366	0,132	32,400	1048,304	2,703	38,037	2,971
1,500	70,230	0,128	2,548	0,141	32,500	1050,506	2,712	38,117	2,980
1,600	75,262	0,137	2,731	0,150	32,600	1052,712	2,720	38,197	2,989
1,700	80,298	0,145	2,914	0,159	32,700	1054,865	2,728	38,275	2,998
1,800	85,338	0,153	3,096	0,169	32,800	1056,995	2,737	38,353	3,007
1,900	90,370	0,162	3,279	0,178	32,900	1059,130	2,745	38,430	3,017
2,000	95,364	0,170	3,460	0,187	33,000	1061,250	2,753	38,507	3,026
2,100	100,371	0,178	3,642	0,196	33,100	1063,329	2,762	38,582	3,035
2,200	105,405	0,187	3,825	0,205	33,200	1065,359	2,770	38,656	3,044
2,300	110,464	0,195	4,008	0,214	33,300	1067,351	2,778	38,728	3,053
2,400	115,512	0,203	4,191	0,224	33,400	1069,344	2,787	38,801	3,062
2,500	120,581	0,212	4,375	0,233	33,500	1071,259	2,795	38,870	3,072
2,600	125,661	0,220	4,560	0,242	33,600	1073,151	2,803	38,939	3,081
2,700	130,701	0,228	4,742	0,251	33,700	1074,975	2,812	39,005	3,090
2,800	135,722	0,237	4,925	0,260	33,800	1076,754	2,820	39,069	3,099
2,900	140,731	0,245	5,106	0,269	33,900	1078,445	2,828	39,131	3,108
3,000	145,715	0,253	5,287	0,278	34,000	1080,141	2,837	39,192	3,117
3,100	150,660	0,262	5,467	0,288	34,100	1081,786	2,845	39,252	3,126
3,200	155,592	0,270	5,646	0,297	34,200	1083,310	2,853	39,307	3,136
3,300	160,508	0,278	5,824	0,306	34,300	1084,717	2,862	39,358	3,145
3,400	165,385	0,287	6,001	0,315	34,400	1086,014	2,870	39,405	3,154
3,500	170,204	0,295	6,176	0,324	34,500	1087,184	2,878	39,448	3,163
3,600	174,993	0,303	6,350	0,333	34,600	1088,266	2,887	39,487	3,172
3,700	179,690	0,312	6,520	0,343	34,700	1089,274	2,895	39,524	3,181
3,800	184,325	0,320	6,688	0,352	34,800	1090,207	2,903	39,558	3,191
3,900	188,899	0,328	6,854	0,361	34,900	1091,038	2,912	39,588	3,200
4,000	193,402	0,337	7,017	0,370	35,000	1091,735	2,920	39,613	3,209

Таблиця Г.10 – FLEX 90 1 зразок

Time, Sec	Strength, N	Strain, mm	Strength, MPA	Strain, %	Time, Sec	Strength, N	Strain, mm	Strength, MPA	Strain, %
0,000	-0,027	0,007	-0,004	0,015	1558,000	143,458	259,673	23,232	590,167
0,100	-0,027	0,023	-0,004	0,053	1558,100	143,429	259,690	23,227	590,205
0,200	-0,008	0,040	-0,001	0,091	1558,200	143,445	259,707	23,230	590,243
0,300	0,000	0,057	0,000	0,129	1558,300	143,472	259,723	23,234	590,281
0,400	-0,011	0,073	-0,002	0,167	1558,400	143,482	259,740	23,236	590,318
0,500	-0,003	0,090	-0,001	0,205	1558,500	143,504	259,757	23,240	590,356
0,600	-0,008	0,107	-0,001	0,243	1558,600	143,522	259,773	23,242	590,394
0,700	0,021	0,123	0,003	0,281	1558,700	143,517	259,790	23,242	590,432
0,800	0,029	0,140	0,005	0,318	1558,800	143,514	259,807	23,241	590,470
0,900	0,010	0,157	0,002	0,356	1558,900	143,544	259,824	23,246	590,508
1,000	0,017	0,173	0,003	0,394	1559,000	143,552	259,840	23,247	590,546
1,100	0,052	0,190	0,008	0,432	1559,100	143,538	259,857	23,245	590,584
1,200	0,046	0,207	0,007	0,470	1559,200	143,557	259,873	23,248	590,621
1,300	0,046	0,223	0,007	0,508	1559,300	143,568	259,890	23,250	590,659
1,400	0,041	0,240	0,007	0,546	1559,400	143,576	259,907	23,251	590,697
1,500	0,054	0,257	0,009	0,584	1559,500	143,576	259,923	23,251	590,735
1,600	0,065	0,273	0,011	0,621	1559,600	143,585	259,940	23,253	590,773
1,700	0,070	0,290	0,011	0,659	1559,700	143,592	259,957	23,254	590,811
1,800	0,078	0,307	0,013	0,697	1559,800	143,608	259,973	23,256	590,849
1,900	0,097	0,323	0,016	0,735	1559,900	143,631	259,990	23,260	590,887
2,000	0,118	0,340	0,019	0,773	1560,000	143,665	260,007	23,266	590,925
2,100	0,141	0,357	0,023	0,811	1560,100	143,665	260,023	23,266	590,962
2,200	0,145	0,373	0,023	0,849	1560,200	143,684	260,040	23,269	591,000
2,300	0,164	0,390	0,027	0,887	1560,300	143,703	260,057	23,272	591,038
2,400	0,192	0,407	0,031	0,924	1560,400	143,703	260,073	23,272	591,076
2,500	0,203	0,423	0,033	0,962	1560,500	143,716	260,090	23,274	591,114
2,600	0,229	0,440	0,037	1,000	1560,600	143,743	260,107	23,278	591,152
2,700	0,280	0,457	0,045	1,038	1560,700	143,760	260,123	23,281	591,190
2,800	0,296	0,473	0,048	1,076	1560,800	143,744	260,140	23,278	591,228
2,900	0,315	0,490	0,051	1,114	1560,900	143,751	260,157	23,279	591,265
3,000	0,378	0,507	0,061	1,152	1561,000	143,776	260,173	23,284	591,303
3,100	0,447	0,523	0,072	1,190	1561,100	143,800	260,190	23,287	591,341
3,200	0,496	0,540	0,080	1,227	1561,200	143,819	260,207	23,291	591,379
3,300	0,558	0,557	0,090	1,265	1561,300	143,832	260,223	23,293	591,417
3,400	0,639	0,573	0,103	1,303	1561,400	143,835	260,240	23,293	591,455
3,500	0,734	0,590	0,119	1,341	1561,500	143,840	260,257	23,294	591,493
3,600	0,830	0,607	0,134	1,379	1561,600	143,852	260,273	23,296	591,531
3,700	0,896	0,623	0,145	1,417	1561,700	143,832	260,290	23,293	591,568
3,800	0,985	0,640	0,160	1,455	1561,800	143,836	260,307	23,293	591,606
3,900	1,073	0,657	0,174	1,493	1561,900	143,863	260,324	23,298	591,644
4,000	1,175	0,673	0,190	1,531	1562,000	143,882	260,340	23,301	591,682

ДОДАТОК Д

ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ЩО БУЛО ВИКОРИСТАНЕ ДЛЯ

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НЕПЕРЕВНОГО ПРОЦЕСУ ДРУКУ

Таблиця Д.1 – Основні характеристики 3D-принтера Creality Ender-3 V2 Neo

Номинальна потужність	350 Вт
Материнська плата	32-бітна безшумна
Технологія друку	FDM/FFF
Діаметр нитки	1.75 мм
Тип матеріалу	ABS, PLA, PETG
Розмір області побудови	220x220x250 мм
Кількість екструдерів (друкуючих головок)	1
Температура підігріву майданчика	макс. 100 °С
Товщина шару	0,1-0,4 мм
Діаметр сопла (мм)	0,4
Робоча температура екструдера	макс. 250 °С
Швидкість друку	макс. 120 мм/сек
Дисплей	4,3" кольоровий
Точність	±0.1 мм
Wi-Fi або ін. бездротова мережа	Ні
Інтерфейс підключення	TF карта, USB
Програмне забезпечення	Creality Slicer / Creality Print / Cura / Repetier-Host / Simplify3D
Операційні системи	Linux, Mac OS, Windows
Формати файлів	STL, OBJ, AMF
Калібровка	CR Touch
Друкована платформа	Магнітна із пружинної сталі
Енергоспоживання	350 Вт
Напруга живлення	100-120В~, 200-240В~, 50/60Гц
Вага (без упакування)	7.8 кг
Розміри (без упакування)	438x424x472 мм
Вага (в упаковці)	9,8 кг
Розміри (в упаковці)	520x505x280 мм
Країна виробництва	Китай

Таблиця Д.2 – Основні характеристики камери, яка була використана для формування даних для неруйнівного контролю в ході адитивного виробництва

Параметр	Значення
Датчик зображення	Sony IMX378
Активні пікселі	4056x3040@60fps
Формат вихідного відео	RAW 12/10/8
Тип фокусу	Auto Focus 8cm – ∞ / Fixed Focus 50cm – ∞
FOV	DFOV: 78° / HFOV: 66 / VFOV: 54
Тип затвора	Rolling shutter
ІЧ-чутливий	Ні

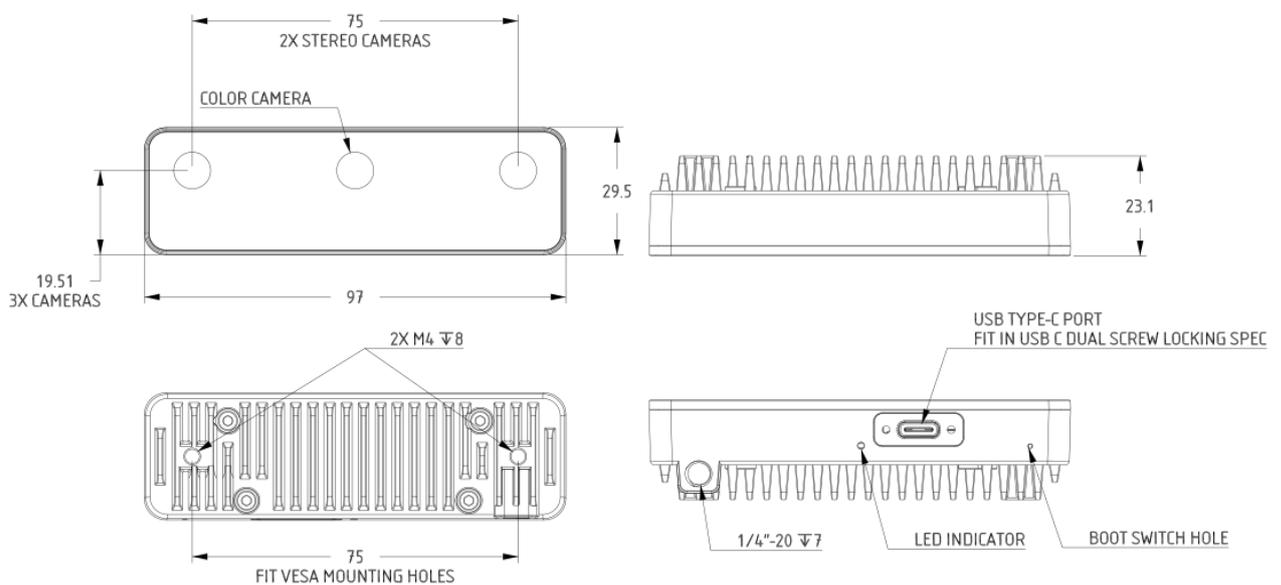


Рис. Д.1 – Загальна схема ОАК-D-S2 від Luxonis

Дана камера для роботизованого бачення, яка сприймає світ як людина, поєднуючи стереокамеру глибини та кольорову камеру високої роздільної здатності з вбудованою нейронною мережею та можливостями комп'ютерного зору.

Основні характеристики

- центральна RGB-камера на 12 МП доступна у варіантах з автофокусом і фіксованим фокусом;
- 4 TOPS обчислювальної потужності;
- USB2 / USB3 для живлення та зв'язок.

ДОДАТОК Е

ВІДОМОСТІ ПРО ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРІАЛІВ

Таблиця Е.1 – Відомості про основні характеристики стандартних матеріалів

	МІН Температура екструдера	МАКС Температура екструдера	МІН Температура платформи	МАКС Температура платформи	Обдур моделі	МІН Швидкість друку	МАКС Швидкість друку	Тип принтера	Діаметр нитки, мм	Похибка (+/-)	Овальність (+/-)	Густина, г/см ³	МІН Температура експлуатації, °С	МАКС Температура експлуатації, °С	Міцність на розтяг, МПа	Відносне видовження при розриві, %	Модуль пружності при розтягу, МПа	Модуль пружності при згині, МПа	МІН Міцність при згині, МПа	МАКС Міцність при згині, МПа	Ударна в'язкість без надрізу по Шарпі (23°C), кДж/м ²	Водопоглинання, % 24ч/23°C, %
ABS	230	240	100	110	NO	30	80	1	1,75	0,05	0,02	1,05	-20	80	40	30	2600	2500	55	70	196	1
ABS+	215	230	80	95	NO	30	80	1	1,75	0,05	0,02	1,05	-20	80	40	35	2700	2800	70	80	208	1
ABS Flex	240	260	60	90	NO	30	40	1	1,75	0,05	0,02	1,03			27		1440	1360				0,04
ABS Pro	200	215	80	90	NO	30	80	1	1,75	0,05	0,02	1,09	-40	80	46	70	2600	2800	70	80	196	1
MBS	230	240	100	110	NO	30	80	1	1,75	0,05	0,02	1,05	50	80	28	50	2100	2000	55	65		0,1
PETG	240	260	30	80	NO	30	80	2	1,75	0,05	0,02	1,25	-20	90	24	50	1920	1980	70	80	104	3
PCTG	200	220	50	70	YES	30	80	2	1,75	0,05	0,02	1,23	-20	70	45	34	1800	53	70	80	105	3
PLA	200	220	50	70	YES	30	80	2	1,75	0,05	0,02	1,24	-10	50	51	30	2300	1440	75	85	102	0,7
PLA+	200	220	50	70	YES	30	80	2	1,75	0,05	0,02	1,24	-10	50	51	30	2300	1440	75	85	102	0,7
T-PLA	190	220	50	70	YES	30	80	2	1,75	0,05	0,02	1,24	-10	50	51	30	2300	1440	75	85	102	0,7
PLA-HT	210	230	60	70	YES	30	80	2	1,75	0,05	0,02	1,24	-10	150	51	30	2300	1440	75	85	102	0,7
PLA-LW	230	240	50	70	YES	30	80	2	1,75	0,05	0,02	1,24	-10	50	51	30	2300	1440	75	85	102	0,7
HIPS	230	245	100	110	NO	30	80	1	1,75	0,05	0,02	1,05	-20	80	30	30	2230	2300	45	55	120	1
SAN	230	240	100	105	NO	30	80	1	1,75	0,05	0,02	1,03	-10	80	71	3	3500	2700	45	55	165	0,2
SILK	235	250	60	70	YES	30	80	2	1,75	0,05	0,02			80	71	3	3500	2700	45	55	165	0,2

Таблиця Е.2 – Відомості про основні характеристики інженерних матеріалів

	МІН Температура екструдера	МАКС Температура екструдера	МІН Температура платформи	МАКС Температура платформи	Об'єкт моделі	МІН Швидкість друку	МАКС Швидкість друку	Тип принтера	Діаметр нитки, мм	Похибка (+/-)	Овальність (+/-)	Густина, г/см ³	МІН Температура експлуатації, °С	МАКС Температура експлуатації, °С	Міцність на розтяг, МПа	Відносне видовження при розриві, %	Модуль пружності при розтягу, МПа	Модуль пружності при згині, МПа	МІН Міцність при згині, МПа	МАКС Міцність при згині, МПа	Ударна в'язкість без надрізу по Шарпі (23°С), кДж/м ²	Водопоглинання, % 24ч/23°С, %
Elastan D70	230	260	90	110	YES	30	80	1	1,75	0,05	0,02	1,15	-40	120	57	370,00		70	80		1	
Elastan D100	230	260	90	110	YES	30	80	1	1,75	0,05	0,02	1,15	-40	80	68	436,00		40	50		1,2	
Elastan D160	230	260	90	110	YES	30	80	1	1,75	0,05	0,02	1,15	-40	80	250	680,00		40	50		1,5	
TPU 40D	225	245	20	60	YES	20	30	1	1,75	0,05	0,02	1,22	-40	140	250	400,00	304				0,6	
TPU 80A	225	245	20	60	YES	20	30	1	1,75	0,05	0,02	1,2	-40	140							0,6	
PET	255	270	60	70	YES	30	80	2	1,75	0,05	0,02	1,27	-20	200	70	50,00	3000	2700			2	
PC	240	260	110	120	NO	30	80	1	1,75	0,05	0,02					52						
Nylon (PA6)	240	270	80	85	NO	30	60	1	1,75	0,05	0,02	1,2	-30	120	78	75,00	2700	2600	75	85	3	
PA	250	260	100	110	NO	30	80	1	1,75	0,05	0,02	1,02			48	9,00	1900				1,5	
PA+	250	260	100	110	NO	30	80	1	1,75	0,05	0,02	1,14	-20	67	66	10,00	2200		90	100	9,6	0,5
ASA	250	265	110	120	NO	30	80	1	1,75	0,05	0,02	1,07	-40	85	48	15,00	2200		40	50	18	3
PBT	250	260	100	110	NO	30	80	1	1,75	0,05	0,02	1,31	-40	120	65	3,00	2550	2500	60	70		1
ABS/PC	240	260	110	120	NO	40	60	1	1,75	0,05	0,02											
PP	200	230	110	120	NO	30	80	1	1,75	0,05	0,02	0,91	0	100	28	13,00	1150				56	0
WAX	140	200	60	90	YES	40	60	2	1,75	0,05	0,02											
NYLON-CGF (GLASS FIBER)	245	260	80	90	NO	30	100	1	1,75	0,05	0,02	1,17										
NYLON-CCF (CARBON FIBER)	260	270	110	120	NO	30	60	1	1,75	0,05	0,02	1,12	-30	120	60	50,00	5800	5800	75	85		3
ABS+FR15 (Flame-Retardant)	215	230	80	90	NO	40	80	1	1,75	0,05	0,02	1,05	-20	80	40	35,00	2700	2800	70	80	20	1
PLA-CCu	200	220	50	70	YES	30	80	2	1,75	0,05	0,02	2,5	-10	50	51	30,00	2300	1440	75	85	102	0,7
PLA-CFe	200	220	50	70	YES	30	80	2	1,75	0,05	0,02	1,09	-40	85	30	5,50	1586					
ABS PRO CCF (CARBON FIBER)	200	210	80	90	NO	30	80	2	1,75	0,05	0,02	1,1	-40	85	32	4,30	1652					3
ABS PRO CGF (GLASS FIBER)	200	210	80	90	NO	30	80	2	1,75	0,05	0,02	1,15	-40	130	24	110,00						1
ELASTAN D70 CCF (CARBON FIBER)	230	240	90	110	YES	30	80	1	1,75	0,05	0,02											0,6

ДОДАТОК Ж

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту
загальної енергетики НАН України
академік НАН України



Віталій БАБАК

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ТОВ «Промел Енергоавтоматика»



Євген ЖОВНОРУК

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів дисертаційного дослідження

Даний акт складено про впровадження результатів, отриманих у ході дисертаційного дослідження Романенка Владислава Володимировича на тему «Інформаційно-вимірювальна технологія контролю якості виробів адитивного виробництва».

Із застосуванням удосконаленої інформаційно-вимірювальної технології адитивного виробництва на підприємстві ТОВ «Промел Енергоавтоматика» проведено проектування і реалізацію моделей у CAD-системах елементів енергетичних об'єктів, а також впроваджено технологію змішування двох полімерів в екструдері, що у сукупності дозволяють більш обґрунтовано приймати проектні рішення щодо виготовлення елементів енергетичного обладнання із матеріалів із заданими характеристиками.

Очікується, що використання отриманих у роботі результатів дозволить зменшити собівартість виробництва відповідних елементів без погіршення експлуатаційних показників обладнання на 5-7%.

Зав. відділу МДОЕ ІЗЕ НАН України
д-р техн. наук

Світлана КОВТУН

Молодший наук. співробітник, аспірант

Владислав РОМАНЕНКО

ЗАТВЕРДЖЕНО
Інститут загальної енергетики
НАН України
 Директор,
 академік НАН України


 Віталій БАБАК
 « » 2024 р.
 ІНСТИТУТ ЗАГАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ
 Ідентифікаційний код 04589671

ЗАТВЕРДЖЕНО
Військова частина А2167


 Командир в/ч А2167,
 ПОЛКОВНИК
 Олександр ОХРИМЕНКО
 « » 2024 р.
 М.П.
 Міністерство оборони України
 Військова частина А2167
 Код 08267926

АКТ

про використання результатів науково-дослідної роботи «Застосування технологій 3D-друку для створення елементів озброєння та комплектуючих бойових БпЛА»

Дійсний акт складено про те, що результати науково-дослідної роботи «Застосування технологій 3D-друку для створення елементів озброєння та комплектуючих бойових БпЛА», яка виконана Інститутом загальної енергетики НАН України відповідно до Цільової науково-технічної програми оборонних досліджень НАН України на 2024 рік та розпорядження Президії НАН України від 27.12.2023 року № 657, а саме дослідні зразки конструктивних елементів радіотехнічного обладнання БПЛА, що виготовлені шляхом застосування удосконаленої технології 3D-друку із запропонованих авторами роботи полімерних композитів з покращеними характеристиками, зокрема, радіопрозорості, були успішно застосовані у підрозділі безпілотних систем. Погіршення радіопрозорості може привести до втрат енергії сигналів надвисоких частот (НВЧ) в каналах передачі даних за рахунок її поглинання конструктивними елементами, до зміни резонансних частот внаслідок поглинання матеріалом вологи і т.і. Тому застосування таких матеріалів дозволяє уникнути некоректної роботи радіотехнічного обладнання БПЛА в діапазоні НВЧ, викликані цим фактором.

Науковий керівник роботи,
 д-р техн. наук, ст. досл.


 Світлана КОВТУН

Командир батальйону безпілотних систем,
 підполковник


 Андрій НАЗАРЕНКО

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної діяльності
Київського міжнародного університету

_____ Вітлана МАРТИНЕНКО

«Серпень» 2024 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
Романенка Владислава Володимировича
на тему: «*Інформаційно-вимірювальна технологія контролю якості
виробів адитивного виробництва*»
на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 175 – «Інформаційно-вимірювальні технології»

Голова: Проректор з навчально-виховної роботи, кандидат юридичних наук, професор
Данченко Тетяна Володимирівна

Члени комісії: завідувач навчальним відділом КиМУ, кандидат економічних наук, доцент
Антонова Олена Михайлівна

завідувач кафедри комп'ютерних наук факультету інформаційних технологій, доктор філософії за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали, доцент кафедри комп'ютерних наук факультету інформаційних технологій
Годлевський Микола Андрійович

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук факультету інформаційних технологій
Сапельнікова Олена Юріївна

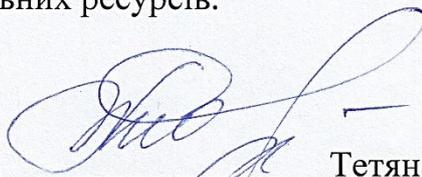
цим актом засвідчує, що результати дисертаційного дослідження Романенка В.В. на тему «Інформаційно-вимірювальна технологія контролю якості виробів адитивного виробництва» впроваджено в освітній процес освітньо-професійної програми підготовки бакалаврів за спеціальністю 122 – «Комп'ютерні науки» в зміст освітніх компонентів «Комп'ютерна графіка» та «Методи та системи штучного інтелекту».

У процес фахової підготовки зазначених вище освітніх компонентів було впроваджено, зокрема:

- швидкісні методи й алгоритми опрацювання зображень і відеопотоків даних із метою прискорення їхнього аналізу;
- метод препроцесінгу графічних об'єктів, які базуються на нормалізації та стандартизації зображень для їхнього морфологічного аналізу;
- методи і засоби машинного навчання для задач з метою розпізнавання образів на прикладі задачі розпізнавання дефектів за даними, що отримуються в процесі адитивного виробництва.

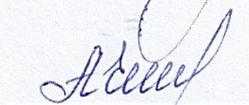
Упроваджені здобуті у процесі наукової роботи результати дисертаційного дослідження Романенка В.В. в освітній процес підвищили якість підготовки студентів за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки, оскільки дали змогу розробляти швидкі методи й алгоритми для розв'язання складних інженерних задач за умови обмежених обчислювальних ресурсів.

Голова комісії:



Тетяна ДАНЧЕНКО

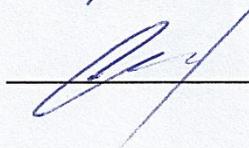
Члени комісії:



Олена АНТОНОВА



Микола ГОДЛЕВСЬКИЙ



Олена САПЕЛЬНИКОВА

ЗАТВЕРДЖУЮДиректор ІЗЕ НАН України,
академік НАН України

Бабак В.П.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ НВП «Ультракон»



Павлій І.В.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів дисертаційного дослідження

Даний акт складено про впровадження результатів, отриманих у ході дисертаційного дослідження Романенка Владислава Володимировича на тему «Інформаційно-вимірювальна технологія контролю якості виробів адитивного виробництва».

Із застосуванням удосконаленої інформаційно-вимірювальної технології адитивного виробництва на підприємстві ТОВ НВП «Ультракон» проведено проектування і реалізацію моделей елементів обладнання ультразвукових систем у САД з використанням технології змішування двох полімерів в екструдері, що у сукупності дозволяє більш обґрунтовано приймати проектні рішення щодо виготовлення елементів обладнання ультразвукових систем контролю із заданими характеристиками.

Очікується, що використання отриманих у роботі результатів дозволить зменшити собівартість виробництва відповідних елементів на 5–7% без погіршення експлуатаційних показників обладнання

Зав. відділу МДОЕ ІЗЕ НАН України

д-р техн. наук

Світлана КОВТУН

Молодший наук. співробітник, аспірант

Владислав РОМАНЕНКО

ДОДАТОК К
ПЕРЕЛІК НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ, У ЯКИХ ВІДОБРАЖЕНО
ТЕОРЕТИЧНІ І ПРАКТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. **Романенко В.В.** Голубєв Л.П. (2020) Дослідження програмного забезпечення для виявлення та виправлення дефектів 3D-друку. *Вісник Херсонського національного технічний університет*, 3 (74), 2020 р. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2020.3.8> (**фахове видання, категорія Б**, ISSN 2078-4481).

2. **Romanenko V.**, Nazarenko O. (2024) Comparative Analysis of Modern Technologies of Additive Production. *System Research in Energy*, 2(77), 84–96. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.02.084>. (**фахове видання, категорія Б**, ISSN 2786-7102).

3. **Romanenko V.**, Khaidurov V., Bekesheva A., Yarovoy R. (2024) Using the variational principle of leveling illumination in images. *ITTAР 2024: 4th International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems*, October 23–25, 2024, Ternopil, Ukraine, Opole, Poland. CEUR-WS.org. (**Scopus**, ISSN 1613-0073). Pp. 355–366. Режим доступу: <https://ceur-ws.org/Vol-3896/paper20.pdf>.

4. **Romanenko V.**, Kovtun S. (2024) Technology of Quality Control of Additive Manufacturing Products During Printing of Elements of Energy Complexes. *System Research in Energy*, 4(80), 84–96. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.110>. (**фахове видання, категорія Б**, ISSN 2786-7102).

5. **Романенко В.**, Хайдуров В. (2024) Аналіз сучасних технологій адитивного виробництва. *The 3rd International scientific and practical conference “European congress of scientific achievements”*, March 25–27, 2024, Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain. 2024. 240 p. ISBN 978-84-15927-35-8. С. 82–88.

6. **Романенко В.** (2024) Порівняльний аналіз забезпечення контролю процесів адитивного виробництва. *The 9th International scientific and practical conference “Current challenges of science and education”*, May 6–8, 2024, MDPC Publishing, Berlin, Germany. 2024. 485 p. ISBN 978-3-954753-05-5. С. 254–259.

7. **Romanenko V.** (2024) State-of-the-art Detection of Defects in the Process of Manufacturing Objects of Serial Additive Manufacturing Based on Artificial Intelligence. *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2024)*. Сімнадцята міжнародна науково-практична конференція, 21–22 травня 2024 р., Київ, Україна. – К.: НАУ, 2024. – 516 с.

8. **Романенко В.** (2024) Технологія контролю якості виробів адитивного виробництва в ході друку елементів енергетичних комплексів. *II Міжнародна науково-практична конференція «Цифрові технології в енергетиці і автоматичності»*, 7 червня 2024 року, м. Київ. ISSN 2786-7102 (Online), ISSN 2786-7633 (Print). С. 43–45.

9. **Романенко В., Заячківський В., Подніжний С.** (2025) Технології і моделі змішування полімерів в екструдері принтерів. *XXX Міжнародна науково-практична конференція «Перспективи розвитку сучасної науки багатoproфільного університету в контексті інтеграції в міжнародний освітній простір»*, 27–28 березня 2025 року, м. Київ. С. 331–336.