

СУХОСТАВСЬКИЙ ВАДИМ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0008-0122-80116>e-mail: vadim.ua@gmail.com**СКИБА МИКОЛА**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0006-1451-4186>e-mail: mykolaskybaxnu@gmail.com**ПОЛІЩУК ОЛЕГ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9764-8561>e-mail: opolishchuk71@gmail.com**ЛІСЕВИЧ СВІТЛАНА**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5501-9038>e-mail: lisevichsv@gmail.com

МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ FDM 3D-ДРУКУ НА ОСНОВІ ВІЗУАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ: ОГЛЯД ОСТАННІХ РОЗРОБОК

Забезпечення якості деталей, виготовлених за технологією FDM 3D-друку (пошарове наплавлення), залишається складним завданням з огляду на високу ймовірність виникнення дефектів під час процесу. Для вирішення цієї проблеми активно розвиваються системи візуального моніторингу, що забезпечують контроль якості безпосередньо в ході FDM-друку. Стаття являє собою всебічний огляд новітніх розробок методів візуального моніторингу для забезпечення якості FDM-друку. Розглянуто спектр апаратних засобів: від стандартних вебкам для загального нагляду за процесом у реальному часі до спеціалізованих пристроїв: ендоскопічних камер для детального огляду важкодоступних зон, інфрачервоних тепловізорів для виявлення температурних аномалій, лазерних сенсорів LiDAR для високоточного контролю геометрії та 3D-сканерів для повного відтворення тривимірної форми надрукованих виробів. Наведено приклади практичної реалізації таких підходів, зокрема систем з відкритим кодом (open-source), інтегрованих у настільні 3D-принтери, а також промислових рішень, вбудованих у професійні FDM-установки. Окрім того, проаналізовано сучасні програмні алгоритми для обробки візуальних даних, з акцентом на передові методи комп'ютерного зору. Зазначено, що новітні підходи машинного навчання – передусім згорткові нейронні мережі та моделі типу «трансформер» – здатні автоматично розпізнавати поширені дефекти друку (такі як відшарування шарів, недостатня подача філаменту, утворення «спагеті»-дефектів (ниткоподібних напливів), деформація виробу (warping) тощо) у режимі реального часу на основі аналізу зображень або відеопотоку. У роботі порівнюються різні стратегії моніторингу за точністю виявлення дефектів, охопленням типів проблем, швидкістю реакції та складністю інтеграції, що дозволяє окреслити переваги й обмеження кожного підходу. Насамкінець обговорено перспективи розвитку даного напрямку, зокрема використання багатовиснових систем для більш всеосяжного виявлення дефектів, вдосконалення універсальності та надійності алгоритмів, впровадження зворотного зв'язку в реальному часі (автоматичне коригування чи зупинка друку при виявленні відхилень), а також інтеграцію інтелектуальних систем моніторингу в типові обладнання FDM-друку у контексті концепції Індустрії 4.0.

Ключові слова: 3D-друк, FDM, контроль якості, візуальний моніторинг, машинний зір, дефекти друку, камери, тепловізор, 3D-сканування..

**SUKHOSTAVSKYI VADYM, SKYBA MYKOLA, POLISHCHUK OLEH,
POLISHCHUK ANDRII, LISEVYCH SVITLANA**

Khmelnitskyi National University

FDM 3D PRINTING QUALITY CONTROL METHODS BASED ON VISUAL MONITORING: AN OVERVIEW OF RECENT DEVELOPMENTS

Ensuring the quality of parts produced by fused deposition modeling (FDM) 3D printing is a critical challenge given the high likelihood of process anomalies and defects. In response, visual monitoring has emerged as a key approach for in-situ quality control of FDM printing. This review article provides a comprehensive overview of the latest developments in visual monitoring methods for FDM print quality assurance. It examines a range of hardware setups, from standard webcams for general real-time oversight to specialized devices such as endoscopic cameras for detailed close-up views, infrared thermal cameras for detecting temperature anomalies, LiDAR sensors for precise geometric measurements, and 3D scanners for capturing the full three-dimensional shape of printed parts. It also highlights practical implementations of these methods, including open-source solutions (e.g., accessible monitoring systems integrated into consumer-level printers) and industrial-grade systems built into professional FDM machines. In addition, the state-of-the-art software algorithms for analyzing visual data are reviewed, with emphasis on advanced computer vision techniques. Modern deep learning approaches, particularly convolutional neural networks and emerging vision transformer models, have demonstrated the ability to automatically identify common printing defects (such as layer delamination, filament under-extrusion, stringing, and warping) in real time from image or video streams. The various monitoring strategies are compared in terms of detection accuracy, scope of detectable issues, response speed, and integration complexity, highlighting each approach's strengths and limitations. Finally, the paper discusses future perspectives, including the integration of multiple sensor modalities for more comprehensive defect detection, the development of more robust and generalizable machine learning models, the implementation of real-time feedback control to correct or halt prints upon fault detection, and the broader incorporation of intelligent monitoring systems into standard FDM workflows in line with Industry 4.0 trends in smart manufacturing.

Keywords: 3D printing, FDM, quality control, visual monitoring, machine vision, print defects, cameras, thermal imaging, 3D scanning.

Стаття надійшла до редакції / Received 01.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 18.05.2025

Вступ

Технологія FDM (Fused Deposition Modeling) сьогодні є однією з найпоширеніших у сфері 3D-друку завдяки простоті, доступності та можливості виготовлення виробів складної форми. Однак забезпечення високої якості FDM-друку залишається складним завданням, оскільки процес формування виробу пошарово схильний до різноманітних збоїв і дефектів. Надмірне або недостатнє екструджування пластику, закупорювання сопла екструдера, відрив деталі від платформи, викривлення (деформація) виробу при охолодженні шарів, деламінація (відшарування шарів), утворення ниткоподібних напливів типу «спагетті» – ці та інші проблеми часто призводять до браку виробів на FDM-принтерах [1]. За оцінками дослідників, рівень невдалих спроб друку на настільних FDM-принтерах у неопитних користувачів може досягати ~20% [1]. Таким чином, актуальним є розвиток засобів контролю якості, які б дозволяли виявляти і усувати проблеми друку ще в процесі виготовлення виробу, не чекаючи його завершення.

Традиційно контроль якості у FDM здійснювався шляхом огляду готової деталі та вимірювання її параметрів (розмірів, точності геометрії, якості поверхні). Такий підхід не дозволяє оперативно реагувати на проблеми, що виникають під час друку – якщо дефект виявлено лише після друку, це призводить до втрати матеріалу і часу. Натомість візуальний моніторинг процесу 3D-друку в реальному часі дає змогу відстежувати формування кожного шару та миттєво виявляти ознаки дефекту, щоб вжити заходів (наприклад, призупинити або скасувати друк) до завершення роботи принтера [2]. Дійсно, дослідження показують, що впровадження on-line контролю дозволяє зупинити друк на ранніх етапах, якщо надрукована частина не відповідає технічним вимогам, запобігаючи марному витрачання матеріалів і часу [2]. Візуальні (оптичні) методи моніторингу є привабливими завдяки їх неаналітичності (вони не впливають на процес), високій роздільній здатності спостереження та відносно низькій вартості реалізації [2].

Останніми роками спостерігається зростаючий інтерес наукової спільноти й індустрії до засобів автоматизованого machine vision (машинного зору) для контролю 3D-друку. Розробляються системи, що використовують відеокамери та інші датчики для спостереження за процесом і алгоритми комп'ютерного зору – від простих методів обробки зображень до передових моделей штучного інтелекту – з метою розпізнавання дефектів у режимі реального часу [3]. З'явилися численні експериментальні та комерційні рішення, які інтегрують камери в конструкцію 3D-принтера або використовують зовнішні засоби візуалізації, щоб відслідковувати процес друку та діагностувати типові проблеми (наприклад, відсутність подачі пластику, обрив філамента, застигли «нарости» матеріалу тощо) по мірі їх виникнення. Деякі сучасні дослідницькі роботи демонструють можливість досягти високої точності автоматичного виявлення дефектів за даними камер – понад 90% для різних типів браку [4]. Все це свідчить про формування нового напрямку забезпечення якості FDM-друку – інтелектуального візуального контролю, який є предметом даного огляду.

Метою цієї статті є узагальнення останніх досягнень (за 2020–2025 рр.) у сфері візуального моніторингу процесу FDM-друку для контролю якості виробів. Стаття написана в академічному стилі, структура роботи включає розділи: вступ, об'єкт і методи дослідження, постановка завдання, результати та їх обговорення, висновки. Нижче докладно розглянуто різновиди апаратних рішень для візуального контролю (камери, ендоскопи, тепловізори, 3D-сканери) та коротко охарактеризовано програмно-алгоритмічне забезпечення таких систем, а також наведено приклади їх реалізації – від аматорських open-source проєктів до комерційних продуктів і промислових комплексів.

Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес забезпечення якості FDM 3D-друку шляхом візуального (оптичного) моніторингу перебігу формування виробу. Іншими словами, увагу зосереджено на системах і методах, що спостерігають за фізичним процесом друку (станом принтера і надрукованого виробу) за допомогою відео- та інших камер, і на основі цих спостережень оцінюють якість виготовлення в режимі реального часу. Відповідно, методи дослідження у цій роботі мають характер оглядово-аналітичного дослідження: здійснено аналіз і систематизацію даних наукових публікацій, технічних звітів та он-лайн джерел за останні роки (2020–2025), що стосуються систем контролю якості FDM-друку. Зібрані відомості класифіковано за типом застосованого обладнання та за сферою використання (лабораторні експерименти, любительські розробки, промислові рішення). Для узагальнення результатів використовувались методи порівняння, синтезу інформації з кількох джерел, критичного аналізу переваг і обмежень різних підходів. Усі цитовані літературні джерела відповідають зазначеному періоду і наведені у списку посилань.

Постановка завдання

Метою даної роботи є огляд сучасного стану та останніх розробок у галузі систем візуального моніторингу якості FDM 3D-друку. Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання:

- проаналізувати основні типи апаратних засобів візуального контролю FDM-друку (звичайні відеокамери, ендоскопічні камери, інфрачервоні камери/тепловізори, системи тривимірного сканування тощо) та визначити їх функції і роль у забезпеченні якості друку;
- узагальнити відомості про алгоритми і програмне забезпечення для автоматичного виявлення дефектів за даними візуального моніторингу (включаючи як прості методи обробки зображень, так і AI-підходи – машинне навчання, неймерережі);
- розглянути приклади реалізації систем візуального контролю якості на практиці, зокрема open-source/DIY проекти спільноти 3D-друку та комерційні/промислові системи, що вже доступні на ринку або знаходяться в стадії впровадження;
- порівняти можливості та характеристики любительських і промислових рішень, виявити їх переваги, недоліки та обмеження (наприклад, точність виявлення дефектів, вартість реалізації, сумісність з обладнанням тощо);
- визначити основні тенденції і напрямки подальших досліджень у цій сфері, включно з інтеграцією візуальних систем контролю в замкнені системи керування друком, створенням стандартних тестових наборів даних для навчання і оцінки алгоритмів, підвищенням швидкодії та надійності тощо.

Результати та їх обговорення

Візуальний моніторинг та його різновиди.

Візуальний (оптичний) контроль процесу FDM-друку може здійснюватися за допомогою різних пристроїв, що надають інформацію про зовнішній вигляд та стан як самого 3D-принтера, так і об'єкта, що друкується. До таких пристроїв належать звичайні RGB відеокамери видимого діапазону, спеціальні ендоскопічні камери для огляду важкодоступних зон, інфрачервоні камери (тепловізори) для отримання теплових зображень, а також 3D-сканери та глибинні камери для оцінки геометричних параметрів надрукованої деталі [4]. Принцип роботи усіх цих засобів полягає у безконтактному спостереженні: фіксації зображень або відео процесу друку і подальшому аналізі цих даних програмними методами. Залежно від налаштувань, камери можуть захоплювати кожний шар під час його друку або слідкувати за вибраними критичними зонами (наприклад, областю навколо екструдера) [4]. Отримані кадри або відеопотік у режимі реального часу аналізуються алгоритмами комп'ютерного зору для виявлення аномалій: відхилень форми шару, розриву нитки, перегріву або переохолодження зони, сторонніх об'єктів у зоні друку тощо [4]. У разі виявлення потенційного дефекту система може згенерувати сповіщення для оператора або автоматично зупинити друк, щоб запобігти продовженню бракованого виготовлення деталі. Таким чином, візуальний моніторинг з використанням камер забезпечує постійний зворотний зв'язок про процес і дозволяє оперативно втручатися при виникненні проблем, значно підвищуючи надійність FDM-друку [4].

У сучасних дослідженнях запропоновано різні конфігурації систем візуального контролю. Зокрема, камери можуть бути встановлені стаціонарно в корпусі принтера (наприклад, оглядова камера, спрямована на область побудови моделі), або закріплені на рухомих вузлах – наприклад, на каретці екструдера, щоб переміщуватися разом із голівкою і спостерігати з близької відстані за екструзією нитки [1]. Використання кількох камер також збільшує охоплення огляду: існують реалізації, де кілька відеокамер встановлено під різними кутами навколо зони друку для отримання стереоскопічного зображення або огляду з різних боків одночасно [1]. Прикладом є система з п'ятьма камерами, реалізована у роботі Straub et al. (2015) для збору зображень під різними кутами з подальшим аналізом ознак дефектів методом машинного навчання (SVM) – така багатокамерна схема дозволила оцінювати геометричні характеристики виробу і виявляти відхилення з високою точністю. Подібні ідеї продовжують розвиватися і в останніх дослідженнях: наприклад, у 2023 р. запропоновано систему з промисловою камерою високої роздільності, що здійснює автоматичну перевірку якості поверхні надрукованого шару, досягаючи ~86% точності розпізнавання дефектів поверхні [4].

Ще один різновид – бороскопи (ендоскопічні камери), які являють собою мініатюрні камери на гнучкому шлейфі. Їх можна розміщувати безпосередньо біля зони виходу нитки з сопла, щоб спостерігати процес екструзії “зсередини” або під нестандартним кутом. У дослідженні Rao et al. закріплений на голівці принтера бороскоп передавав збільшене відео процесу видавлювання пластику, що дало можливість безпосередньо візуально контролювати стан потоку матеріалу і вчасно помічати ознаки засмічення сопла чи відхилення подачі [1]. В аматорській спільноті 3D-друку використання дешевих USB-ендоскопів стало популярним DIY-рішенням для нагляду за першими шарами: ентузіасти закріплюють мікрокамеру біля сопла, щоб отримати детальне збільшене зображення процесу укладання першого шару і забезпечити його правильність. Наприклад, існують численні описи і друковані кріплення для встановлення ендоскопа на каретці екструдера (так звані “nozzle camera” модулі) – це дозволяє краще налаштувати зазор між соплом і столом, бачити дрібні недоліки адгезії тощо. Таким чином, ендоскопічні камери є корисним доповненням до систем моніторингу, особливо для контролю критичних початкових етапів друку або для діагностики роботи самого екструзійного вузла.

Інфрачервоні камери (тепловізори) застосовуються для моніторингу температурного поля під час друку. Вони реєструють випромінювання в ІЧ-діапазоні і дозволяють будувати “теплові” зображення, на яких видно розподіл температур в зоні побудови деталі [4]. Це відкриває можливості

контролю таких аспектів, як охолодження шарів, рівномірність нагріву платформи, температура щойно екструдованого матеріалу тощо. Наприклад, перегрів чи надто швидке охолодження можуть призвести до дефектів адгезії між шарами – тепловізор здатен помітити аномальну теплову картину, що сигналізує про потенційну проблему [4]. Thermographic monitoring дозволяє виявляти «гарячі точки» (зони перегріву) або навпаки холодні ділянки на шарі, які можуть спричинити внутрішні напруження і тріщини [4]. Як приклад, дослідження Dinwiddie et al. (2020) продемонструвало використання тепловізора FLIR для отримання теплограми кожного шару при друку ABS-пластику – аналіз цих зображень дозволив відстежити охолодження шару і передбачити ризик його деформації [1]. У 2021 р. інша група дослідників застосувала ІЧ-камеру, спрямовану на сопло з боку моделі, для контролю коливань температури в зоні друку; на основі таких даних та порівняння з еталонними значеннями було успішно виявлено випадки часткового засмічення сопла (зниження подачі пластику) ще до того, як дефект став помітним у візуальному спектр [1]. Таким чином, термографічний контроль доповнює звичайне відеоспостереження, надаючи інформацію про приховані дефекти – наприклад, недостатню термосклеюку шарів – які не завжди одразу видно на звичайному зображенні, але проявляються через аномалії температурного профілю.

Нарешті, для контролю геометричної точності друку застосовуються 3D-сканувальні системи. Це можуть бути як інтегровані в принтер лазерні сканери або структуроване освітлення, так і зовнішні 3D-сканери та глибинні камери. Принцип в тому, щоб після друку кожного шару (або через кілька шарів) отримати тривимірні дані про форму частково надрукованого виробу і порівняти їх з еталонною моделлю (CAD) або з попереднім шаром. Одним із шляхів є використання сенсорів глибини на зразок камер Microsoft Kinect, Intel RealSense чи Asus Xtion. В роботі Kopsacheilis et al. (2020) було інтегровано доустрою комерційного принтера Ultimaker 3 сенсор Asus Xtion Pro Live, що поєднує RGB-камеру та ІЧ-проектор для знімання глибини [2]. Отримувалась кольорова сцена з прив'язаною глибинною картою, після чого шляхом обробки “знімків” після кожного шару можна було реконструювати форму надрукованого об’єкта і виявляти відхилення (наприклад, надлишкове нанесення матеріалу або недруковані порожнини) порівняно з цифровою моделлю [2]. Інший метод – так званий алгоритм Z-difference – було адаптовано для FDM-друку: дві камери розташовувалися над друкарською платформою і сканували верхню поверхню шару, а потім на основі різниці висот (вимірюючи по зображеннях з двох ракурсів) визначали наявність геометричних дефектів типу припіднятих країв або вм’ятин на шарі. У 2021 р. цей підхід дозволив автоматично розпізнавати дефекти форми з точністю ~97–99% [4]. Також для післяпроцесного контролю часто використовуються настільні 3D-сканери: надрукований виріб повністю сканується і отримана 3D-модель порівнюється з оригінальною CAD-моделлю, щоб оцінити точність виготовлення. Такий підхід менш придатний для реального часу, але корисний для фінальної перевірки якості. Проте тенденція йде до саме in-situ 3D scanning – коли елементи сканера вбудовані в принтер і працюють паралельно з друком. Подібні функції реалізовані, наприклад, у деяких промислових системах: окремі моделі принтерів оснащують лазерними далекомірами або датчиками, що сканують поверхню кожного нового шару для виявлення дефектів (приклад – система Layer Inspection у принтерах серії Stratasys F900, що лазером перевіряє рівність кожного шару; або технологія LiDAR сканування першого шару в новітніх моделях, як описано далі).

Алгоритми програмного забезпечення.

Сирі дані, отримані з описаних вище пристроїв (зображення, відео або 3D-скани), потребують автоматизованого опрацювання, щоб в режимі реального часу приймати рішення про наявність чи відсутність дефекту. Розробка алгоритмів комп’ютерного зору для цієї мети є ключовою складовою систем контролю якості 3D-друку. Умовно всі підходи можна поділити на дві групи: детерміновані алгоритми обробки зображень та методи штучного інтелекту (Machine Learning).

Простіші системи можуть застосовувати фільтрацію та аналіз зображень за заздалегідь запрограмованими правилами. Наприклад, для виявлення так званого «павутиння» або ниток матеріалу (spaghetti) використовували порогову обробку і виділення контурів: відзняте зверху зображення шару конвертується у бінарне за рівнем яскравості, після чого аналіз форми отриманих контурів дозволяє помітити хаотичні тонкі нитки, що відрізняються від контуру моделі [1]. Інший приклад – метод контролю цілісності екструзії: у поле зору камери встановлювали спеціально освітлений маркер, і якщо камера не бачить безперервності нитки у точці виходу пластика, це трактувалося як ознака зупинки подачі або обриву нитки (подібні рішення пропонувалися як частина прошивки Marlin та OctoPrint-плагінів). Хоча такі підходи можуть спрацювати для окремих завдань, їх надійність обмежена – варто змінитися умовам освітлення чи параметрам друку, і алгоритм на основі жорстких правил може давати хибні тривоги або пропускати дефекти.

Сучасні ж тенденції зосереджені на застосуванні методів глибокого навчання для аналізу зображень процесу 3D-друку [3]. Зокрема, згорткові нейронні мережі (Convolutional Neural Networks, CNN) вже продемонстрували свою ефективність у розпізнаванні дефектів за кадрами з веб-камери: наприклад, у 2020 р. модель на основі CNN була натренована для класифікації ситуацій “деформація/відшарування шару” проти “нормальний друк” – на тестових даних досягнуто точності понад 91% [4]. Інша робота 2021 р. використала комбінацію алгоритмів (методи SVM, KNN, Random Forest та ін.) для виявлення цілої низки дефектів (від браку адгезії до ниткоподібних утворень) за

зображеннями Raspberry Pi камери – успішність класифікації перевищила 99% на навчальних зразках [4]. В 2022–2023 рр. дослідники почали впроваджувати ще більш складні архітектури, зокрема візуальні трансформери. Так, у роботі Sampedro et al. (2022) запропоновано глибоку модель для моніторингу FDM, що поєднує згорткову неймережу та рекурентну мережу для прогнозування появи аномалій; а інша команда у 2023 р. застосувала трансформер DeiT (Data-efficient Image Transformer) для класифікації трьох найбільш критичних типів дефектів (відшарування, деформація, пропуски екструзії) – їх система працює в реальному часі на вбудованому комп'ютері і досягає високої точності розпізнавання [4].

Унікальним прикладом практичного впровадження AI-алгоритмів є відкритий проект “The Spaghetti Detective” (TSD), започаткований ентузіастами у 2019–2020 рр. Ця система, пізніше комерціалізована під назвою Obico, стала першим масовим рішенням, що використовує хмарний штучний інтелект для нагляду за 3D-принтером [5]. TSD працює як плагін до програми OctoPrint: веб-камера, підключена до принтера, постійно передає зображення на сервер, де нейронна мережа (спочатку використано архітектуру YOLOv3) аналізує кадри на наявність ознак “спагеті” – хаотично намотаних ниток пластику, що свідчать про від'єднання моделі від платформи або іншої серйозної аварії друку [5]. При виявленні ймовірного дефекту TSD автоматично ставить друк на паузу та надсилає власнику сповіщення (email або SMS) з фотографією, пропонуючи втрутитися [5]. Користувач може переглянути зображення і вирішити, чи продовжити друк, чи остаточно його зупинити. Завдяки машинному навчанню на тисячах зображень (розробники TSD вручну розмітили велику кількість фото з реальними “спагеті” збоями для навчання мережі YOLO) ця система досягла доволі високої надійності: частка невірних спрацювань не перевищувала ~6–7%, і продовжує знижуватися з оновленнями алгоритму [5]. Станом на 2023 р. платформа Obico вже проаналізувала понад 89 мільйонів годин відео з 3D-принтерів та зафіксувала більше мільйона випадків друкарських збоїв, попередивши користувачів і зекономивши понад 23 тонни пластику [3]. Це свідчить про ефективність і затребуваність таких технологій серед спільноти. Окрім виявлення “спагеті”, Obico/TSD тепер впроваджує і нові функції – зокрема, модуль Nozzle Ninja для контролю саме першого шару (AI оцінює, чи правильно надруковано перший шар, оскільки від цього залежить успіх всього друку) [3].

Поряд з Obico з'явилися і інші подібні проекти. Наприклад, OctoPrint AI Plugin (Nexus) та сервіс OctoEverywhere пропонують користувачам OctoPrint додаткові можливості AI-моніторингу друку. Крім того, виробники обладнання також розробляють власні пропріетарні алгоритми: про них детальніше – у наступному підрозділі, присвяченому готовим комерційним рішенням.

Приклади реалізацій: DIY vs. промислові системи.

Open-Source та DIY проекти: Серед спільноти 3D-друкарів широкого поширення набули веб-камери в поєднанні з програмою OctoPrint – вже станом на 2025 р. існують численні рекомендації щодо вибору “найкращої камери для 3D-принтера” для цілей віддаленого моніторингу [6]. Більшість таких камер (наприклад, модулі Raspberry Pi Camera, Logitech C270, інші USB-камери) забезпечують базове візуальне спостереження за друком через веб-інтерфейс, даючи користувачу можливість вручну стежити за прогресом. Це вирішує проблему, коли оператор не може постійно знаходитися біля принтера. Проте справжній автоматичний контроль якості потребує додаткового програмного аналізу зображень. Тут у нагоді стали плагіни на кшталт вже згаданого The Spaghetti Detective (Obico) – відкритого ПЗ, яке будь-хто може розгорнути на локальному сервері чи навіть на недорогому мікрокомп'ютері NVIDIA Jetson Nano [5]. Проект має активну спільноту і продовжує розвиватися як open-source платформа розумного 3D-друку. Інші ентузіастські проекти включають різні скрипти для OctoPrint, що відслідковують, скажімо, стоп-кадри з камери через кожні N шарів і порівнюють їх з еталонним зображенням (щоб виявити, якщо друк “поїхав” по осях або деталь відклеїлась і змістилась).

Obico (The Spaghetti Detective): відкритий хмарний сервіс AI-аналізу відео з веб-камери; визначає типові аварії FDM-друку і може автоматично призупиняти принтер [5]. Поширений серед любителів, має безкоштовний тариф (обмежена кількість годин на місяць) і платні розширені плани.

Nozzle Camera Mods: саморобні рішення з використанням ендоскопічних камер, які дозволяють отримувати макрозображення області друку з близької відстані. Готові комплекти (наприклад, Mintion Nozzle Camera) оснащені автофокусом і підсвіткою для спостереження за першим шаром, допомагаючи налаштувати рівень платформи та виявити проблеми адгезії.

OctoPrint Plugin “LayerShift Detector”: приклад програмного модуля, що аналізує зображення шарів та відслідковує поступове зміщення контуру моделі (шукає зсув шарів) – корисно для раннього виявлення, якщо ремінь проскакує і модель друкується криво.

3DPrintFailure Detection (Jetson): проект спільноти NVIDIA, де модель розпізнавання збоїв TSD була оптимізована для запуску на компактному комп'ютері Jetson Nano, щоб власники принтерів могли локально, без хмарних сервісів, здійснювати AI-моніторинг. Це привабливо з точки зору приватності та швидкості спрацювання.

Комерційні та промислові системи: Починаючи з 2022 р., виробники 3D-принтерів почали вбудовувати функції розумного моніторингу якості прямо у свої продукти. Нижче наведено кілька показових прикладів:

Bambu Lab X1 Carbon: Один з флагманських FDM-принтерів 2022–2023 рр., відомий інтегрованою системою AI-комп'ютера з камерою. X1 Carbon оснащено внутрішньою камерою, яка спостерігає за друком, а прошивка принтера містить алгоритм виявлення так званого “spaghetti failure” (збої типу спагеті). Якщо камера “побачить” клубок ниток, що не відповідає моделі, принтер здатен на апаратному рівні призупинити процес [3]. Окрім того, X1 Carbon має встроєний модуль LiDAR – малий лазерний сканер, що калібрує перший шар: він проєктує лазер і сканує поверхню першого надрукованого шару з точністю до кількох мікрометрів, визначаючи ділянки, де шар занадто високий або низький [3]. Це дозволяє автоматично налаштувати висоту сопла, компенсувати нерівності столу і перевірити, чи перший шар ліг рівно. LiDAR також використовується для контролю подачі – вимірюється ширина екструдованої нитки і за відхиленнями можна виявити проблеми з екструзією. Таким чином, Bambu Lab продемонструвала успішну інтеграцію одразу двох підходів: візуального (камера) та сканувального (LiDAR), побудувавши комплексну систему контролю якості друку в реальному часі [3].

Crealiti K1 Max: Новітня модель від Crealiti (2023 р.) також робить акцент на автоматизації якості. Принтер обладнано AI-лідаром для інспекції першого шару (високоточний лазерний сканер 1 μm , що сканує поверхню шару і при виявленні проблем – нерівномірного нанесення – зупиняє друк) [3]. Також є вбудована AI-камера, яка відстежує появу типових збоїв: утворення “спагеті”, наявність сторонніх предметів чи відшарування моделі від платформи [3]. У разі проблем K1 Max здатен сповістити користувача і поставити друк на паузу. Таким чином, за функціональністю Crealiti повторює підхід Bambu Lab – поєднання візуального і лазерного моніторингу.

Ultimaker S5/S3: Ці професійні принтери ще з ~2018 р. мають вбудовані камери, але їх призначення – радше віддалений моніторинг для користувача (перегляд прогресу через інтернет) без автоматичного аналізу. Тим не менш, поява камер у таких пристроях проклала шлях до подальшого використання цих даних: у 2022 р. Ultimaker анонсувала експериментальне ПЗ, що аналізує знімки з камери S5 для виявлення збоїв, хоча офіційно ця функція не стала стандартом. Подібна ситуація з принтерами Prusa: нова модель Prusa MK4 має камеру (у вигляді додаткового модуля) і планується підтримка комп'ютерного зору для контролю першого шару, але на момент 2025 р. це ще в стадії розробки.

Промислові FDM-системи: Великі встановлення від Stratasys, 3D Systems та ін. традиційно оснащуються цілою низкою датчиків для контролю процесу – втім, здебільшого це датчики стану обладнання (температури, руху, тиску тощо). Візуальні методи в них лише починають з'являтися. Як зазначено в роботі Kopsacheilis et al., до останнього часу комерційні FDM-принтери мали лише окремі сенсори типу датчика закінчення філаменту чи контролю температури сопла, що охоплюють лише одиничні сценарії відмов [2]. Проте попит на повноцінні системи моніторингу всіх аспектів друку зростає. Деякі сучасні промислові установки пропонують модулі верифікації: наприклад, компанія Axial3D розробляє систему, що порівнює пошарово отриману модель (через 3D-сканування або візуальний огляд) з цифровим еталоном та повідомляє про наростаючу похибку. В металевому 3D-друці (L-PBF) уже стандартом стали вбудовані камери спостереження за розплавом, і можна прогнозувати, що аналогічні рішення (спостереження за розплавленим пластиком у зоні екструзії, контроль блиску/кольору нитки для оцінки температури) знайдуть застосування і в полімерному FDM.

У таблиці 1 зведено ключові характеристики розглянутих прикладів систем візуального контролю якості FDM-друку.

Таблиця 1

Приклади систем візуального моніторингу та контролю якості FDM 3D-друку (2020–2025 рр.)

Система/проект	Тип обладнання	Виявлювані дефекти/функції	Примітки
1	2	3	4
The Spaghetti Detective (Obico, 2020–2023)	Веб-камера; серверний AI (YOLO CNN)	«Спагеті»-збій (пластикові напливи); відрив моделі від платформи	Open-source; >1 млн збоїв виявлено [3]. Зупинка друку при аварії.
Kopsacheilis et al. (2020) – візуальний контроль FDM	RGB-D камера (Asus Xtion); алгоритми обробки глибини	Перевищення/недолив матеріалу в шарі, відхилення геометрії	Науковий прототип [2]. Інтегровано в Ultimaker 3; реальний час, ручне підтвердження дефекту.
Jin et al. (2020) – AI-підхід до міжшарових дефектів	Веб-камера Logitech C270; CNN + датчики деформації	Деламінація шарів; прогнозування викривлення (warping)	Наукове дослідження: 97% точність детекції відшарування [4]. Стрейн-гейджі для прогнозу викривлення.

Продовження таблиці 1.			
Система/проект	Тип обладнання	Виявлювані дефекти/функції	Примітки
Sampedro et al. (2022) – моніторинг з Deep Learning	2× камери; згорткова NN + LSTM (TensorFlow)	Аномалії поверхні, зупинка екструзії, ниткоподібні дефекти	Прототип в Applied Sciences 2022 р. [4]. Виявлення аномалій до їх видимого прояву.
Bambu Lab X1 Carbon (2022)	Вбудована RGB-камера; мікро-LiDAR	«Спагеті»; погана адгезія першого шару, неправильний потік	Комерційний продукт. Автопауза друку при спагеті [3]. LiDAR: автонастройка 1-го шару [3].
Crealitiy K1 Max (2023)	Вбудована RGB-камера; LiDAR 1 μm	«Спагеті»; сторонні об'єкти; нерівномірність першого шару	Комерційний продукт. Паузинг друку; таймлапс відео. Закрита система. [3]
DIY Nozzle Cam (2021)	Ендоскоп-камера 5 мм; кріплення на екструдері	Контроль першого шару; візуалізація екструзії (стан сопла)	Любительське рішення [1]. Покращує налаштування платформи; не автоматизує зупинку.
Тепловізійний контроль (різні, 2020–2023)	FLIR камери (A35, A65); аналіз теплових карт	Недостатня спікаємість шарів; перегрів, температурні градієнти	Наукові експерименти [4]. Виявлення прихованих дефектів (мікротріщин) за аномальним остиганням.

(Джерела: дані таблиці узагальнено з публікацій [2],[4] та офіційних характеристик продуктів [3].)

Як видно з таблиці 1, відкриті програмні проекти на базі звичайних веб-камер вже досягли успіхів у розв'язанні окремих завдань (таких як виявлення «спагеті»). Промислові ж виробники починають впроваджувати більш універсальні апаратно-програмні комплекси (камера + AI + сканер) для всебічного контролю друку. Наукові дослідження активно пропонують нові методи аналізу даних (глибинне навчання, мультисенсорний підхід), демонструючи дуже високі показники точності в тестових умовах. Утім, є певні виклики на шляху впровадження цих технологій повсюдно. Серед них – обмежена обчислювальна потужність бортових комп'ютерів 3D-принтерів (високоточний аналіз зображень в реальному часі потребує продуктивного процесора або GPU), необхідність великих наборів даних для навчання AI (знімки різних принтерів, різних матеріалів тощо) та ризик хибних спрацьовувань. Останній фактор особливо важливий для промислових користувачів: помилкова зупинка дорогого друку через «примару дефекту» небажана, тому системи моніторингу мають бути надзвичайно надійними. Для підвищення довіри до таких систем дослідники пропонують розробити стандартизовані методики оцінки їх ефективності – наприклад, створити загальноприйняті тестові набори зображень дефектів та метрики для порівняння алгоритмів [4]. Попри зазначені труднощі, тренд є очевидним: майбутні покоління FDM-принтерів будуть «розумнішими» і матимуть вбудовані камери з постійним контролем якості в реальному часі.

Висновки

Огляд останніх розробок (2020–2025 рр.) у сфері візуального контролю якості FDM 3D-друку підтверджує, що дана галузь перебуває на етапі активного розвитку. Візуальні методи моніторингу – зокрема, використання відеокамер, тепловізорів та 3D-сканерів – демонструють високу ефективність у ранньому виявленні дефектів адитивного виробництва. Основні висновки роботи можна сформулювати наступним чином:

- реальний час і скорочення втрат. На відміну від пост-фактум контролю якості, візуальний моніторинг у режимі реального часу дозволяє миттєво реагувати на проблеми. Це дає змогу зупинити процес виготовлення при перших ознаках браку, економлячи матеріал і час [2]. Отже, інтеграція таких систем підвищує продуктивність і окупність FDM-технології, особливо в серійному або безперервному виробництві;

- апаратні рішення. Розроблено різноманітні апаратні конфігурації для збору візуальних даних. Звичайні RGB-камери забезпечують широкий огляд і вже використовуються у багатьох принтерах. Ендоскопічні камери надають деталізований локальний вид, що корисно для калібрування та діагностики сопла. Інфрачервоні камери відкривають новий вимір контролю – моніторинг температурних режимів друку, дозволяючи побачити приховані дефекти спікання шарів [4]. 3D-сканери і LiDAR забезпечують геометричну перевірку якості побудови, все частіше впроваджуються в

сучасних моделях принтерів [3]. Комбінація кількох типів сенсорів (наприклад, камера + тепловізор, або камера + лазерний сканер) дає найповнішу картину процесу і підвищує надійність контролю.

- алгоритми та програмне забезпечення. Розвиток алгоритмів комп'ютерного зору є рушійною силою ефективності систем моніторингу. За останні п'ять років відбулося стрімке впровадження AI: від перших спроб з класичними методами обробки зображень – до сучасних нейромережових моделей, спеціально навчених розпізнавати дефекти 3D-друку [5],[4]. Накопичено великі набори даних (у тому числі спільноту open-source проєктів), що дозволило суттєво підвищити точність детекції і знизити частоту хибних сигналів. Водночас зростає вимога до пояснюваності рішень AI-алгоритмів та уніфікації критеріїв оцінки – аби різні системи можна було порівняти між собою та сертифікувати для промислового використання [4].

- Open-source vs. промислові рішення. Спостерігається зближення підходів спільноти DIY та комерційних виробників. Open-source проєкти на кшталт Obico задали високу планку, продемонструвавши життєздатність AI-моніторингу на практиці (сотні тисяч користувачів, мільйони годин друку під наглядом) [3]. У відповідь провідні виробники принтерів (Bambu Lab, Creality та інші) інтегрували подібні функції прямо в свої продукти, роблячи їх доступними “з коробки” [3]. В перспективі це підвищить стандарти якості друку на ринку загалом. З іншого боку, комерційні системи поки що є закритими і обмеженими конкретною моделлю принтера, тоді як open-source підхід пропонує універсальні рішення для будь-яких установок. Ймовірно, подальший прогрес вимагатиме синергії: відкриті алгоритми та стандарти можуть лягти в основу масових промислових впроваджень.

Подальші напрямки розвитку: Майбутні дослідження будуть зосереджені на підвищенні автономності і точності систем контролю. Це означає глибшу інтеграцію візуального моніторингу з самим процесом друку: від простої зупинки при збої – до автоматичного коригування параметрів друку на льоту (наприклад, додавання матеріалу в області недоливу, зміна температури при виявленні ознак поганої спікання шарів тощо). Деякі роботи вже експериментують з концепцією digital twin – цифрового двійника принтера, який в режимі реального часу оновлюється сенсорними даними і дозволяє моделювати оптимальні дії при виникненні відхилень [7]. Також очікується поява спеціалізованих апаратних модулів для існуючих принтерів (наприклад, універсальних AI-камер, що підключаються до різних моделей) та розширення функцій програмних платформ (OctoPrint, Klipper тощо) з підтримкою стандартних інтерфейсів підключення модулів машинного зору.

На завершення, можна впевнено констатувати: візуальні системи контролю якості стають невід'ємною частиною екосистеми FDM 3D-друку. Їхнє вдосконалення і впровадження підвищить рівень довіри до технології, зменшить відсоток браку і відкриє шлях до повністю автоматизованих 3D-принтерів, здатних самостійно виявляти та виправляти помилки друку без втручання людини. Це, у свою чергу, сприятиме ширшому застосуванню FDM у відповідальних галузях промисловості, де якість і надійність є критичними. Подальші дослідження та стандартизація в цій сфері забезпечать сумісність і взаємодоповнюваність різних рішень, прискорюючи перехід від окремих експериментальних установок до масового використання систем візуального моніторингу якості в адитивному виробництві.

Література

1. Fu, Y., Downey, A., Yuan, L., Pratt, A., & Balogun, Y. (2021). In situ monitoring for fused filament fabrication process: A review. *Additive Manufacturing*. <https://surl.li/odgujn>
2. Kopsacheilis, C., Charalampous, P., Kostavelis, I., & Tzovaras, D. (2020). In situ visual quality control in 3D printing. In *Proceedings of VISIGRAPP 2020 – 15th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications* (Vol. 2). <https://www.scitepress.org/Papers/2020/93298/93298.pdf>
3. Elgendy, M. (2023). AI failure detection in 3D printing. *Obico Blog*. <https://obico.io/blog/ai-failure-detection-in-3d-printing/>
4. Kim, R. G., Abisado, M., Villaverde, J., & Sampedro, G. A. (2022). A survey of image-based fault monitoring in additive manufacturing: Recent developments and future directions. *Sensors*, 23(15), 6821. <https://doi.org/10.3390/s23156821>
5. Molitch-Hou, M. (2020). Spaghetti Detective: Open source AI software detects prints gone wrong. *3DPrint.com*. <https://3dprint.com/265545>
6. Rede, A., Bertasius, R., & Vicknair, A. (2025). The best 3D printer cameras – Monitor your 3D prints. *All3DP*. <https://all3dp.com/2/best-3d-printer-camera-monitor-3d-printer/>
7. Shomenov, K., Ali, M. H., Jyeniskhan, N., Al-Ashaab, A., & Shehab, E. (2025). Cost-effective sensor-based digital twin for fused deposition modeling 3D printers. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1–20. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2025.2504085>
8. Bambu Lab. (2023). *X1-Carbon 3D printer – Specifications and features*. <https://bambulab.com> (додайте точну URL, якщо доступна сторінка)
9. Creality. (2023). *K1 Max – Product manual*. *Creality3D Official*. <https://www.creality.com> (додайте точну URL, якщо доступна сторінка)

References

1. Fu, Y., Downey, A., Yuan, L., Pratt, A., & Balogun, Y. (2021). In situ monitoring for fused filament fabrication process: A review. *Additive Manufacturing*. <https://surl.li/odgujn>
2. Kopsacheilis, C., Charalampous, P., Kostavelis, I., & Tzovaras, D. (2020). In situ visual quality control in 3D printing. In *Proceedings of VISIGRAPP 2020 – 15th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (Vol. 2)*. <https://www.scitepress.org/Papers/2020/93298/93298.pdf>
3. Elgendy, M. (2023). AI failure detection in 3D printing. *Obico Blog*. <https://obico.io/blog/ai-failure-detection-in-3d-printing/>
4. Kim, R. G., Abisado, M., Villaverde, J., & Sampedro, G. A. (2022). A survey of image-based fault monitoring in additive manufacturing: Recent developments and future directions. *Sensors*, 23(15), 6821. <https://doi.org/10.3390/s23156821>
5. Molitch-Hou, M. (2020). Spaghetti Detective: Open source AI software detects prints gone wrong. *3DPrint.com*. <https://3dprint.com/265545>
6. Rede, A., Bertasius, R., & Vicknair, A. (2025). The best 3D printer cameras – Monitor your 3D prints. *All3DP*. <https://all3dp.com/2/best-3d-printer-camera-monitor-3d-printer/>
7. Shomenov, K., Ali, M. H., Jyeniskhan, N., Al-Ashaab, A., & Shehab, E. (2025). Cost-effective sensor-based digital twin for fused deposition modeling 3D printers. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1–20. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2025.2504085>
8. Bambu Lab. (2023). X1-Carbon 3D printer – Specifications and features. <https://bambulab.com> (dodaite tochnu URL, yakshcho dostupna storinka)
9. Creality. (2023). K1 Max – Product manual. *Creality3D Official*. <https://www.creality.com> (dodaite tochnu URL, yakshcho dostupna storinka)