

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ ПОМИЛОК ПІД ЧАС 3D-ДРУКУ

М. В. Голуб^{1,а}

¹ Навчально-науковий Фізико-технічний інститут

Анотація

У статті розглянуто проблему помилок та браку під час 3D-друку методом пошарового наплавлення філаменту. Близько 30% друків мають помилки, тоді як у технології лиття пластику під тиском — лише 7%. Така велика частка помилок особливо критична у серійному виробництві деталей. Для зменшення витрат на продовження друку вже забракованих помилкою деталей застосовують методи виявлення помилок. У статті для сучасних методів виявлення помилок наведено класифікацію та проведено їх порівняння за областю та вимогами застосування, а також за помилками, які можуть бути виявлені цими методами. Обґрунтовано необхідність одночасного використання методів на основі датчиків та на основі комп'ютерного зору. Окреслено напрямки подальших досліджень.

Ключові слова: 3D-друк, комп'ютерний зір, нейронні мережі, виявлення помилок.

Вступ

У сучасному світі 3D-друк активно застосовується в дуже широкому спектрі галузей, у тому числі оборонній промисловості. 3D-принтери забезпечують левову частку швидкого прототипування та серійного виробництва деталей складних форм.

Найпопулярніший вид 3D-друку для серійного виробництва пластикових деталей, швидкого прототипування та домашніх проектів — друк методом пошарового наплавлення філаменту (англ. *Fused Filament Fabrication* та *Fused Deposition Modeling*, далі — друк, принтер). Ця технологія полягає в наплавленні філаменту (монітки матеріалу, зазвичай пластику) шар за шаром. Побудова шарів відбувається за рахунок руху голови відносно столу принтера. Будову типового 3D-принтера зображено на рис. 1.

3D-друк має суттєвий недолік — значну частоту браку. На великих тиражах це завдає значних збитків та втрат часу.

Мета цієї статті — оглянути та порівняти сучасні методи виявлення помилок.

1. Різні будови 3D-принтерів

Дві основні будови 3D-принтерів: декартові та дельта, їх зображено на рис. 2. Декартові використовують три перпендикулярні вісі, дельта — три паралельні. Декартові принтери є більш поширеними [2].

Декартові принтери можна класифікувати на два основних підтипи: коробковий та арочний (мостовий, іноді англ. *bedslinger* [4]). В арочних 3D-принтерах стіл рухається вздовж горизонтальної вісі, а в коробкових — вздовж вертикальної. На рис. 3

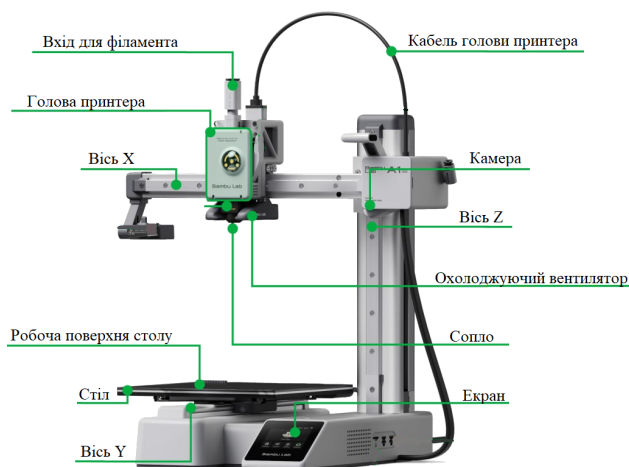


Рис. 1. Основні частини 3D-принтера (зображено Vambu Lab A1 Mini). Взято і перекладено з [1].

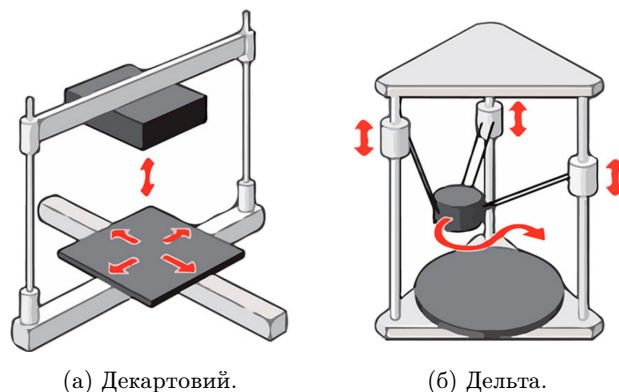
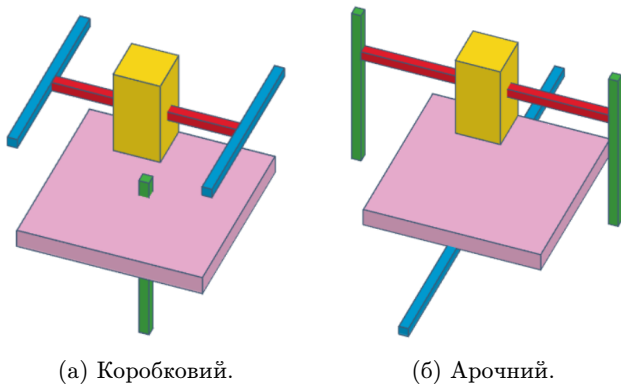


Рис. 2. Декартовий та дельта 3D-принтери, схематичне зображення. Взято і перекладено з [3].

^аMVHlub@proton.me

схематично зображено ці підтипи.



(а) Коробковий.

(б) Арочний.

Рис. 3. Коробковий та арочний декартові 3D-принтери, схематичне зображення (стіл позначено рожевим, голову — жовтим, швидкі горизонтальні вісі руху — червоним та синім, повільні вертикальні — зеленим).

2. Частота помилок 3D-друку

Брак виникає через помилки в техпроцесах, пов'язаних з 3D-друком. У таблиці 1 наведено огляд робіт, в яких містяться дані щодо частоти помилок: загалом 30% друків мають помилки (для порівняння, у технології лиття пластику під тиском браку лише 7% [5]). Джерела [6, 7, 8], в яких наявні дані щодо частоти помилок, досліджували вплив конкретних факторів на частоту, а не загальний рівень частоти. Залежність частоти браку від ключових конструкційних параметрів принтера (таких як його будова, швидкість руху при друці, тип поверхні столу тощо) залишається недослідженою.

Задача попередження помилок і браку шляхом розробки більш досконалих принтерів складна, і, скоріше за все, її результатом буде дорогий і складний в обслуговуванні принтер. Можна зробити припущення, що дешеві принтери найближчим часом продовжать своє існування і, відповідно, будуть робити помилки. Вчасне виявлення таких помилок — це захист рухомих частин принтера від пошкоджень та зупинка витрат на деталь, яка вже стала браком через помилку.

Помилки можна поділити на три категорії за етапом їх виникнення: при підготовці друку, під час друку та після друку. При підготовці до 3D-друку та при постобробці надрукованої деталі відповідальна людина постійно залучена і може помітити власні помилки, особливо якщо вони критичні (наприклад, злам деталі). Під час друку головний виконавець — 3D-принтер. Відповідно, залучення значних людських ресурсів для спостереження за процесом друку є зайвою витратою. Зазвичай, це вирішується інтервальним спостереженням, але це все ще залучає людину і є незручним для деяких випадків (наприклад, друк вночі).

Методи, які спостерігають за належною якістю виконання друку, дозволяють людині, яка відповідає за друк, перевіряти його лише у разі справжньої

проблеми, а не періодично. Така автоматизація спостереження дозволяє збільшити кількість принтерів, за якими спостерігає одна людина та не чекати на людину, щоб зупинити друк в критичній ситуації. Це прямо зменшує витрати для великих підприємств з сотнями принтерів.

3. Методи спостереження за процесом друку на основі датчиків

Тривіальний спосіб автоматизувати спостереження за певним пристроєм — використовувати датчики. Дельта і декартові (коробкові та арочні) принтери хоч і мають різну будову, проте більшість їх елементів типова. Це дозволило розробити датчики для більшості місць, в яких виникають помилки: датчики температури в соплі, датчик наявності філаменту, датчики струму моторів (можуть вказати на проблеми з ремнями та на заплутування філаменту на котушці), датчики для автоматичного калібрування висоти столу тощо. Такі датчики поширені комерційно [9].

Окрім цих датчиків, у роботі [10] запропоновано використовувати тензодатчики для виявлення короблення. Запропонований метод потребує змін конструкції столу принтера, щоб тензодатчики могли відчувати силу, з якою деталь намагається стиснутись від охолодження.

Головне обмеження методів на основі датчиків — вони здатні спостерігати лише за фізичними параметрами принтера.

4. Методи спостереження за процесом друку на основі комп'ютерного зору

Для спостереження за деталлю і робочою зоною застосовують методи на основі комп'ютерного зору (далі — МКЗ). Вони не потребують такого близького контакту, як механічні датчики, і дешевші у застосуванні, аніж безконтактні датчики достатньої точності і роздільної здатності.

Часта помилка, яка завжди призводить до браку, — це відкріплення деталі від столу. Хоч метод [10] і здатний це розпізнавати датчиками, МКЗ роблять цю ж задачу неінвазивно. Методи, запропоновані у роботах [13, 14, 15], працюють наступним чином: програма обраховує положення деталі, і, якщо положення різко змінилось, — сталося відкріплення. Ці методи працюють достатньо надійно, але оригінальні пропозиції працюють лише для однієї деталі одночасно і потребують строго горизонтального розміщення камери, щоб сопло не перекривало деталь у кадрі. Також у всіх трьох роботах [13, 14, 15] запропоновані додаткові методи виявлення помилок з закупоренням сопла та зупинкою подачі філаменту. В наш час, такі помилки виявляються датчиками.

Для подолання вимоги чіткого ракурсу і для забезпечення незалежності методу від кількості та форми друкованих деталей застосовують класифікатори на основі нейронних мереж. У процесі друку широкий

Таблиця 1. Кількість друків N, з них невдалих F (забраковані помилкою або потребували втручання людини) і % невдалих друків у дослідженнях [6, 7, 8].

N	F	%	Коментар
113	43	≈ 38%	У [6] досліджувався вплив вологості на частоту помилок. Вологість була в межах 19% – 50%, що не є рідкістю в приміщеннях. Виявлено слабку негативну кореляцію між вологістю і частотою невдалих друків.
478	≈ 124	≈ 26%	У [7] досліджувалась стабільність роботи механізму зміни філаменту під час друку. Можна зробити припущення, що більшість помилок пов'язані саме з механізмом, а не з іншими джерелами помилок. 26% це 7% браку і 19% врятовані втручанням людини.
95	39	≈ 41%	У [8] досліджувався вплив досвіду дизайнерів деталей та операторів 3D-принтерів на частоту помилок. Вплив визнано статистично незначущим. З 39 невдалих друків 30 мали помилку під час друку.

Таблиця 2. Порівняння методів за областю застосування (Δ, □, A — дельта, коробкові і абочні принтери відповідно; ДД — Декілька деталей одночасно; КВ — Комерційне використання; РВ — Розміщення відеокамери; + — Застосовано до)

N	Група методів	Δ	□	A	ДД	КВ	РВ
1	Поширені датчики [9]	+	+	+	+	+	без камери
2	Датчики короблення [10]			+			без камери
3	Розпізнавання типових структурних елементів, які виникають внаслідок помилок [11, 12]		+		+	+	довільне
4	Трекінг руху деталі [13, 14, 15]		+	+			збоку
5	Розпізнавання поганих перших шарів [10] та заповнення [16]		+	+	+		на голові, дивиться вниз [16]; збоку [10]
6	Порівняння деталі або її частини з «ідеальним» зображенням/рендером [15, 17, 18]		+	+	+		згори [15, 18], довільне [17]

Таблиця 3. Порівняння методів за видами помилок, які вони розпізнають (N1,N2,... — методи, у відповідності до табл. 2; + — розпізнає; Т — розпізнає з затримкою; ~ — розпізнає ненадійно; П — попереджає помилку)

Помилка/Група помилок	N1	N2	N3	N4	N5	N6
Помилки філаменту	+			Т	~	~
Несправність механіки	+					
Відкріплення від столу			Т	+	П	+
Короблення		+		~	П	~
Злам невеликої частини деталі			~	~		+
Пропуски в лініях заповнення	П				+	~
Неправильна висота столу	+				+	
Зсув шарів відносно попередніх	~		~		П	+

спектр помилок має два однакові симптоми: утворення спагеті (рис. 4) та великої краплі пластику на соплі. Через це розпізнавачі таких симптомів активно використовуються [11, 12]. Їх недолік — затримка між помилкою і проявленням симптому. У випадку відкріплення деталі від столу, ці методи можуть виявити помилку після того, як відбудеться пошкодження механіки принтера.

Також існують методи, які розпізнають ранні візуальні симптоми — вигляд першого шару [16] та вигляд заповнення [10]. Такі симптоми свідчать про неправильний або неякісний друк, який в подальшому призведе до більш критичних помилок. Ці методи потребують положення камери чітко згори. Окрім цього, через величезну кількість різних заповнень, створення датасетів ускладнене.

Існує клас методів, який поєднує швидкість спра-

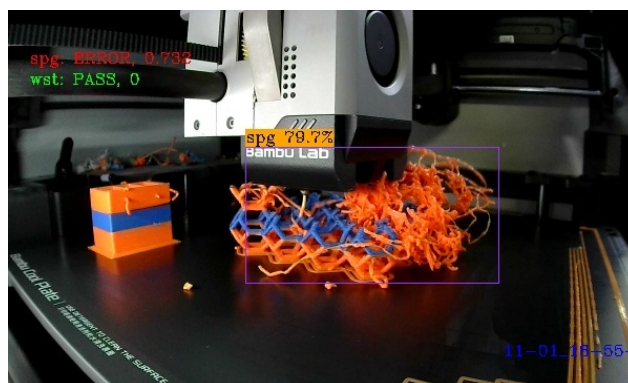


Рис. 4. Метод виявлення спагеті нейронною мережею. Взято з [11].

цьовування методів трекінгу з незалежністю від форми моделі методів на основі нейронних мереж — порівняння фото моделі, що друкується, з «ідеальним» фото або рендером [15, 17, 18]. Час спрацювання в найгіршому випадку дорівнює інтервалу між послідовними «ідеалами». Недолік цих методів — довга підготовка «ідеалів»: фотографування потребує один друк, а створення рендерів займає багато часу. Для масового виробництва, час підготовки є знехтовним, оскільки для серії деталей «ідеали» будуть однаковими.

Висновки

Огляд літератури показав, що загалом близько 30% 3D-друків мають помилки, що значно перевищує 7% у технології лиття пластику під тиском.

З порівняльних таблиць 2 і 3 видно, що:

- Методи на основі датчиків та на основі комп'ютерного зору виявляють різні набори помилок. Відповідно, необхідно одночасно використовувати і методи на основі датчиків, і МКЗ.
- Методи порівняння деталі з «ідеалом» є найкращими за кількістю помилок, які вони можуть виявити. Але їх застосування вимагає довгої підготовки.
- Поєднання методів на основі датчиків з методами трекінгу деталі, розпізнавання спагеті і краплі пластику та розпізнавання неякісних перших шарів і заповнення забезпечує покриття всіх помилок без потреби у довгій підготовці для методів порівняння з «ідеалом».
- Об'єднання МКЗ потребує використання декількох відеокамер.

Обмеженням цього огляду є відсутність емпіричного порівняння розглянутих методів. Без цього вибір найкращої комбінації методів для конкретного виробничого сценарію залишається нетривіальним.

На підставі оглянутих матеріалів можна запропонувати наступні напрямки досліджень:

- проведення експериментальних порівнянь різних методів, що виявляють однакову помилку;
- збір та аналіз даних щодо джерел помилок і браку під час 3D-друку та в пов'язаних з ним техпроцесах;
- об'єднання методів в єдину систему для розширення спектру помилок, що виявляються;
- розробка перетворення відеопотоку, яке дозволить застосовувати методи, які потребують різного положення камер, використовуючи лише одну камеру.

Також можна відзначити, що трендом є розробка та впровадження методів розпізнавання типових структурних елементів, які виникають внаслідок помилок. Це може бути пов'язано з тим, що ці методи не залежні від більшості властивостей оточення, в якому відбувається 3D-друк, та від того, що саме друкується.

Перелік використаних джерел

1. *Bambu Lab*. A1 mini — Bambu Lab Wiki. — URL: <https://wiki.bambulab.com/en/a1-mini> (дата зверн. 07.04.2026).
2. A Comparative Study of Cartesian and Delta 3D Printers on Producing PLA Parts / B. M. Schmitt, C. F. Zirbes, C. Bonin, D. Lohmann, D. C. Lencina, A. d. C. S. Netto // *Materials Research*. — 2018. — Т. 20, Suppl. 2. — С. 883—886. — DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2016-1039. — URL: https://www.researchgate.net/publication/322937955_A_Comparative_Study_of_Cartesian_and_Delta_3D_Printers_on_Producing_PLA_Parts.
3. *Earls A., Baya V.* The road ahead for 3-D printing / PwC Center for Technology, Innovation. — 2014. — URL: <https://www.pwc.com/us/en/technology-forecast/2014/3d-printing/features/assets/pwc-3d-printing-full-series.pdf> (дата зверн. 22.04.2026).
4. *Van Driel A.* Ink-gel simultaneous embedded 3D printing : дис. ... маг. / Van Driel A. — Cape Town, South Africa : University of Cape Town, Department of Mechanical Engineering, 2025. — URL: <https://open.uct.ac.za/bitstreams/960b820b-7542-49e7-a0fb-4f1bfdf966a/download>.
5. Quality Improvement in Plastic Injection Molding Industry: Applying Lean Six Sigma to SME in Kuwait / A. Alshammari, S. Redha, S. Hussain, T. Nazzal, Z. Kamal, W. Smew // *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. — Bandung, Indonesia : IEOM Society International, 2018. — С. 2856—2865. — URL: <https://ieom.society.org/ieom2018/papers/666.pdf> (дата зверн. 26.04.2026).
6. *Pieper J.* Investigating the Relationship Between Humidity and 3D Printing Failures in a Makerspace : Advanced Research final paper / Wheeler High School. — 12.2023. — URL: <https://campus.kennesaw.edu/colleges-departments/coles/academics/information-systems-security/labs/mad-lab/pieperfinal.pdf> (дата зверн. 22.04.2026).
7. *Prusa Research*. Original Prusa i3 MK3S and MMU2S release, SL1 and powder-coated sheets update. — 02.2019. — URL: https://blog.prusa3d.com/original-prusa-i3-mk3s-and-mm2s-release-sl1-and-powder-coated-sheets-update_29599/ (дата зверн. 22.04.2026).
8. *Song R., Telenko C.* Causes of Desktop FDM Fabrication Failures in an Open Studio Environment // *Procedia CIRP*. — 2019. — Т. 80. — С. 494—499. — DOI: 10.1016/j.procir.2018.12.007. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118312861> ; 26th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference.

9. *Bambu Lab*. A1 Mini — Technical Specifications. — URL: <https://bambulab.com/en/a1-mini/tech-specs> (дата зверн. 07.04.2026).
10. *Jin Z., Zhang Z., Gu G. X.* Automated Real-Time Detection and Prediction of Interlayer Imperfections in Additive Manufacturing Processes Using Artificial Intelligence // *Advanced Intelligent Systems*. — 2020. — Т. 2, № 1. — С. 1900130. — DOI: [10.1002/aisy.201900130](https://doi.org/10.1002/aisy.201900130). — URL: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aisy.201900130> (дата зверн. 26.04.2026).
11. *Bambu Lab*. Spaghetti Detection — Knowledge Sharing. — URL: https://wiki.bambulab.com/en/knowledge-sharing/Spaghetti_detection (дата зверн. 07.04.2026).
12. *Bambu Lab*. Introduction to P2S Intelligent Detection. — URL: <https://wiki.bambulab.com/en/p2s/manual/intelligent-detection> (дата зверн. 07.04.2026).
13. *Baumann F., Roller D.* Vision Based Error Detection for 3D Printing Processes // *Proceedings of the International Conference on Frontiers of Sensors Technologies (ICFST 2016)*. Т. 59. — 2016. — С. 06003. — (MATEC Web of Conferences). — DOI: [10.1051/mateconf/20165906003](https://doi.org/10.1051/mateconf/20165906003). — URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2016/22/mateconf_icfst2016_06003/mateconf_icfst2016_06003.html.
14. *Paulsen T.* Visual error detection on 3D printing : bathesis / Paulsen T. — Norwegian University of Science, Technology (NTNU), 2019. — URL: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2656788/no.ntnu:inspera:50848485:10008463.pdf?sequence=1> (дата зверн. 12.04.2026).
15. *Langeland S. A.* Automatic Error Detection in 3D Printing Using Computer Vision : дис. ... маг. / Langeland S. A. — Western Norway University of Applied Sciences; University of Bergen, Department of Informatics, 2020. — URL: <https://hdl.handle.net/1956/21450> (дата зверн. 12.04.2026).
16. Enhancing Surface Fault Detection Using Machine Learning for 3D Printed Products / V. Kadam, S. Kumar, A. Bongale, S. Wazarkar, P. Kamat, S. Patil // *Applied System Innovation*. — 2021. — Т. 4, № 2. — С. 34. — DOI: [10.3390/asi4020034](https://doi.org/10.3390/asi4020034). — URL: <https://www.mdpi.com/2571-5577/4/2/34>.
17. *Petsiuk A., Pearce J. M.* Towards Smart Monitored AM: Open Source in-Situ Layer-wise 3D Printing Image Anomaly Detection Using Histograms of Oriented Gradients and a Physics-Based Rendering Engine // *Additive Manufacturing*. — 2022. — Т. 52. — С. 102690. — DOI: [10.1016/j.addma.2022.102690](https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102690). — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221486042200951> (дата зверн. 12.04.2026).
18. *Delli U., Chang S.* Automated Process Monitoring in 3D Printing Using Supervised Machine Learning // *Procedia Manufacturing*. — 2018. — Т. 26. — С. 865—870. — DOI: [10.1016/j.promfg.2018.07.111](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.111). — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918307820> (дата зверн. 26.04.2026) ; 46th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 46, Texas, USA.