https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-98
УДК 678.05

СУХОСТАВСЬКИЙ ВАДИМ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0009-0008-0122-8011
e-mail: vadim.ua@gmail.com
ЛІСЕВИЧ СВІТЛАНА
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0002-5501-9038
e-mail: lisevichsv@gmail.com

МЕЖІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ В КОНТРОЛІ ЯКОСТІ FDM/FFF ДРУКУ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ

У статті виконано критичний аналіз обмежень комп'ютерного зору в системах контролю якості FDM/FFF 3D друку та окреслено клас дефектів, для яких візуальне спостереження у видимому діапазоні є принципово недостатнім. Актуальність теми зумовлена тим, що сучасні RGB камери, системи 2D/3D візуалізації та алгоритми машинного навчання уже добре розпізнають поверхневі й геометричні відхилення — зсуви шарів, недоекструзію, переекструзію, stringing (ниткоподібні дефекти), відрив деталі від столу після його зовнішнього прояву та контурні помилки. Проте вирішальні для міцності, герметичності й довговічності друкованої деталі порушення значно частіше мають прихований, об'ємний або матеріалозалежний характер. На основі огляду сучасних праць з процесу моніторингу, неруйнівного контролю та матеріалознавчих досліджень показано, що стандартний комп'ютерний зір не забезпечує надійного прямого виявлення внутрішньої пористості без поверхневого прояву, замкнених каверн, «kissing bonds» (тип дефекту зчеплення, коли поверхні двох шарів (або шару та основи) торкаються одна одної, але не утворюють справжнього, міцного молекулярного або хімічного зв'язку), реальної міжшарової міцності, залишкових напружень до моменту деформації, змін кристалічності, термодеструкції, вологості матеріалу, а також ранніх станів закупорки сопла або ковзання філаменту, якщо вони ще не відобразилися на поверхні виробу. Запропоновано класифікацію дефектів за критерієм спостережуваності: прямо видимі, опосередковано видимі та невидимі для стандартної візуальної системи. Для кожної групи невидимих або слабкоспостережуваних дефектів визначено доцільні альтернативні методи діагностики: мікро КТ для внутрішньої геометрії та пористості; активну інфрачервону термографію, ультразвук, оптичну когерентну томографію та моніторинг електричного опору для підповерхневих порожнин і дефектів з'єднання; датчики сили, волоконно-браггівські ґратки (Fiber Bragg Grating — FBG), цифрову кореляцію зображень і тепломеханічні цифрові двійники для залишкових напружень і латентного викривлення; а також вібраційні, акустико емісійні, струмові, температурні та енкодерні сигнали для раннього виявлення несправностей екструдера. Окремо обґрунтовано, що оцінювання міжшарової міцності, кристалічності та деградації полімеру потребує механічних випробувань, калориметрії, спектроскопії або реологічного моніторингу, оскільки ці характеристики не є оптично спостережуваними напряму. Практична цінність роботи полягає у формуванні мультимодальної архітектури контролю якості, у якій комп'ютерний зір розглядається як перший, але не єдиний, рівень контролю.

Ключові слова: *FDM; FFF; 3D друк; комп'ютерний зір; дефекти друку; неруйнівний контроль; мікро КТ; термографія; ультразвук; міжшарова адгезія.*

SUKHOSTAVSKYI VADYM, LISEVYCH SVITLANA
Khmelnytskyi National University

THE LIMITS OF COMPUTER VISION IN FDM/FFF PRINTING QUALITY CONTROL AND ALTERNATIVE DIAGNOSTIC METHODS

The paper presents a critical review of the limits of computer vision in quality control of FDM/FFF 3D printing and identifies the defect classes for which standard visible-range imaging is fundamentally insufficient. The relevance of the topic stems from the fact that modern RGB cameras, 2D/3D vision systems, and machine-learning models already perform well in recognizing surface and geometric deviations such as layer shift, under-extrusion, over-extrusion, stringing, externally manifested bed detachment, and contour errors. However, the defects that most strongly determine structural performance, sealing, and long-term reliability are often hidden, volumetric, or material-state dependent. Based on current literature on in-situ monitoring, nondestructive evaluation, and polymer-process characterization, the study demonstrates that standard computer vision cannot directly and reliably detect internal porosity without surface manifestation, enclosed voids, kissing bonds, actual interlayer bond strength, residual stresses before visible deformation, changes in crystallinity, thermal degradation, moisture-related material state, or early nozzle clogging and filament-slip conditions when they have not yet affected the visible surface. A defect observability framework is therefore proposed, distinguishing directly visible, indirectly inferable, and non-observable defects from the standpoint of conventional computer vision. For each defect category beyond the effective range of vision-only inspection, appropriate complementary diagnostic methods are mapped: micro-CT for internal geometry and volumetric porosity; active infrared thermography, ultrasonics, optical coherence tomography, and electrical-resistance monitoring for sub-surface defects and bonding anomalies; force sensing, fibre Bragg grating sensors, digital image correlation, and thermo-mechanical digital twins for residual stress build-up and latent warpage; and vibration, acoustic emission, motor-current, temperature, pressure, and encoder signals for early extruder faults. The paper further argues that interlayer strength, crystallinity development, and polymer degradation must be assessed through mechanical testing, calorimetry, spectroscopy, or rheological monitoring, because these quality indicators are not directly observable in optical images. The main contribution is a practically oriented multimodal quality-control concept in which computer vision remains a highly valuable first-line tool for exposed geometry and process anomalies, but cannot serve as a stand-alone acceptance criterion for safety-critical or function-critical FDM/FFF parts.

Keywords: *FDM; FFF; 3D printing; computer vision; print defects; nondestructive evaluation; micro-CT; thermography; ultrasonics; interlayer adhesion.*

Стаття надійшла до редакції / Received 17.03.2026
Прийнята до друку / Accepted 11.04.2026
Опубліковано / Published 28.05.2026

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons CC-BY 4.0

© Сухоставський Вадим, Лісевич Світлана

Вступ

FDM/FFF друк став одним із найпоширеніших способів полімерного адитивного виробництва завдяки низькій вартості, простоті обладнання та широкому спектру матеріалів. Саме тому системи контролю якості для цього процесу дедалі активніше переходять від післяопераційної перевірки до *in situ monitoring* (моніторинг безпосередньо на місці). Найшвидше розвивався напрям комп'ютерного зору: камери й алгоритми порівнюють фактичну геометрію шару з G code, фіксують відхилення контурів, класифікують дефекти та інколи запускають ранню зупинку процесу. Водночас систематичні огляди показують, що в матеріальній екструзії фокус досліджень і далі зміщений переважно на геометрію, переповнення або недозаповнення шару, тоді як механічні властивості, відносна щільність і матеріальний стан досі контролюються обмежено. Отже, ключова наукова проблема полягає не в тому, чи може комп'ютерний зір бути корисним, а в тому, де закінчується його *спостережуваність* (observability) і починається потреба в інших методах діагностики [1].

У цьому контексті розмежування між «виявити дефект», «спрогнозувати ризик дефекту» і «підтвердити придатність деталі» є принциповим. Комп'ютерний зір найчастіше працює на першому рівні й частково на другому, але лише рідко - на третьому. Саме тому його слід розглядати як важливий інструмент оперативного моніторингу, а не як універсальний замінник усіх процедур кваліфікації [1].

Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом дослідження є методи контролю якості FDM/FFF-друку в частині виявлення дефектів, які *не можуть бути безпосередньо встановлені стандартним комп'ютерним зором*. Методично робота побудована як критичний аналітичний огляд праць з in situ monitoring (моніторинг безпосередньо на місці), неруйнівного контролю та матеріалознавчої кваліфікації екструдованих полімерів. Під «комп'ютерним зором» у цій статті розуміються системи зовнішнього оптичного спостереження у видимому діапазоні — RGB-камери, 2D/3D-камери та алгоритми аналізу зображень. Інфрачервона термографія, ОСТ, рентгенівська томографія, ультразвук, електричні, силові, вібраційні та акустичні сигнали розглядаються як окремі діагностичні модальності, здатні доповнювати або замінювати візуальний канал. Для інтерпретації літератури використано критерій фізичної спостережуваності дефекту (observability): чи має дефект прямий поверхневий прояв, чи може бути лише непрямо інферований, чи взагалі не містить надійних оптичних ознак [1].

Постановка завдання

Метою дослідження є визначити, які дефекти FDM/FFF друку неможливо або ненадійно виявляти засобами стандартного комп'ютерного зору, та обґрунтувати, які методи діагностики доцільно застосовувати в кожному такому випадку. Для досягнення мети поставлено три завдання: по перше, окреслити фактичні можливості візуального контролю в матеріальній екструзії; по друге, виділити групи дефектів, для яких відсутня пряма оптична спостережуваність (observability); по третє, побудувати практичну схему мультимодального контролю якості для виробів різної відповідальності.

Результати та їх обговорення

Наявні дослідження засвідчують, що комп'ютерний зір найбільш ефективний там, де дефект формує помітну геометричну або текстурну аномалію на доступній для камери поверхні. До такої групи належать зсуви шарів, груба недоекструзія чи переекструзія, stringing (ниткоподібні дефекти), пропуски контуру, відрив від столу після його зовнішнього прояву, порушення форми бокових поверхонь і локальні відхилення від G-code. Проблема починається тоді, коли якість уже не збігається з видимістю. Для оптичного контролю типовими залишаються три фізичні межі: відсутність глибинної інформації, компроміс між полем зору та роздільною здатністю і сильна залежність від кольору, шорсткості, кристалічності, тіней та складності сцени. Тому камера може бачити поверхню шару, але не завжди «розуміє» об'ємну структуру виробу [2].

Першою великою групою невидимих для стандартного комп'ютерного зору дефектів є внутрішня пористість, міжрастрові та міжшарові порожнини, замкнені каверни й приховані геометрії. Їх критичність полягає в тому, що вони знижують щільність, модуль, міцність і герметичність, хоча зовнішній контур деталі може залишатися прийнятним. Огляди та експериментальні роботи прямо вказують, що оптичні та навіть термографічні методи надають для таких дефектів лише обмежену глибинну інформацію або непрямі ознаки, тоді як X-ray CT (X-ray Computed Tomography, або комп'ютерна томографія) дає пряме уявлення про внутрішні дефекти. Саме тому для кваліфікації відповідальних деталей базовим методом слід вважати мікро-КТ або промислову рентгенівську томографію; як швидші in situ або межові альтернативи можуть використовуватися активна термографія, ультразвук, ОСТ для невеликої глибини проникнення та моніторинг електричного опору для провідних композицій [3].

Другою групою є дефекти з'єднання між шарами, насамперед неповне зварювання, часткова деламінація та «kissing bonds» (тип дефекту зчеплення, коли поверхні двох шарів (або шару та основи) торкаються одна одної, але не утворюють справжнього, міцного молекулярного або хімічного зв'язку). Їх особливість у тому, що геометрично інтерфейс може виглядати коректно, але фактична дифузія полімерних ланцюгів і контактна площа виявляються недостатніми. Саме тому реальна міжшарова міцність не є оптично спостережуваною характеристикою. Для таких випадків доцільні активна інфрачервона термографія, яка реєструє зміну теплових властивостей у зоні дефекту, ультразвуковий контроль, електричний імпедансний або резистивний контроль у

провідних матеріалах, а також механічні випробування - насамперед міжшаровий розтяг, короткобалкові та інші тести, які безпосередньо оцінюють здатність інтерфейсу переносити навантаження. Для технологічного прогнозування придатні моделі, що пов'язують міжшарову міцність з тепловою історією та параметрами друку, проте вони не скасовують потреби у верифікації для критичних виробів [4].

Третьою групою є залишкові напруження, латентне викривлення та термомеханічні деформації до їх зовнішнього прояву. Звичайна RGB-камера зазвичай фіксує вже наслідок - підняття кута, зміщення траєкторії або відхилення сопла від фактичної поверхні. Проте до моменту видимого warpage (дефект, при якому краї або кути надрукованої деталі піднімаються, згинаються або відриваються від друкарської платформи, деформуючи геометричну форму виробу) у деталі може накопичитися суттєвий запас напружень, що визначатиме подальшу стабільність форми і тріщиностійкість. Для цієї групи дефектів потрібні методи, які реєструють напружено-деформований стан або його проксі-ознаки: волоконно-бреггівські ґратки (інтегровані всередину надрукованої деталі спеціальні оптичні волокна, які діють як сенсори (датчики) для відстеження фізичного стану об'єкта в реальному часі), датчики сили на екструдері, цифрова кореляція зображень, температурні поля в поєднанні з тепломеханічним цифровим двійником. Саме силовий контроль і FBG-сенсори дають змогу бачити не лише результат, а й механіку його формування [2].

Четверта група охоплює матеріалозалежні характеристики, які часто визначають ресурс деталі, але не мають обов'язкового оптичного прояву: кристалічність, ступінь термодеструкції, молекулярну релаксацію, вологість філаменту та зміну реології розплаву. Для напівкристалічних полімерів саме кристалічність визначає жорсткість, усадку й посткристалізаційні зміни, однак зовнішня поверхня може не містити чіткого візуального маркера. Аналогічно, перегрів або гідролітичне пошкодження полімеру можуть погіршувати адгезію і в'язкість ще до появи видимого браку. У таких випадках релевантними є швидка сканувальна калориметрія або DSC/FSC (диференціальна скануюча калориметрія), FTIR/Raman-спектроскопія (високоефективні методи аналітичної хімії, що використовуються у 3D-друку для дослідження хімічного складу, структури та якості полімерних матеріалів), контроль масового потоку й in-line реологічний моніторинг із вимірюванням тиску, температури та витрати. Тобто йдеться вже не про машинний зір, а про контроль матеріального стану процесу [5].

П'ята група - ранні відмови екструдера та системи подачі: часткова закупорка сопла, ковзання філаменту, пропуски кроків, обрив нитки. Якщо чекати, поки ці аномалії проявляться на вже надрукованій поверхні, процес часто переходить у фазу незворотного браку. Саме тому для раннього попередження доцільні датчики вібрації, акустичної емісії, струму крокового двигуна, енкодери подачі, а також датчики тиску й температури у зоні екструзії. Такі канали виявляють джерело відмови раніше, ніж камера побачить пропуск матеріалу [6].

Практичний висновок з наведеного аналізу полягає в необхідності багаторівневої архітектури контролю якості. Перший рівень - комп'ютерний зір для поверхневих і контурних дефектів. Другий - сигнали стану машини та екструдера: струм, вібрація, акустика, тиск, температура, енкодери. Третій - неруйнівні методи для підповерхневих і прихованих дефектів: термографія, ультразвук, ОСТ, електричні методи. Четвертий - кваліфікаційні методи для критичних деталей і матеріалів: мікро-КТ, механічні випробування, калориметрія та спектроскопія. У такій схемі комп'ютерний зір залишається швидким і дешевим фронтовим фільтром, але не є остаточним критерієм приймання виробу [1].

Окремо слід підкреслити принципову різницю між дефектом як геометричним об'єктом і дефектом як носієм функціонального ризику. Для комп'ютерного зору найпростішим є те, що має межу в зображенні: контур, тінь, текстуру, зміну висоти або форми. Для інженера з якості найважливішим часто є інше: чи витримає деталь розтяг, циклічне навантаження, внутрішній тиск або термозмінні режими. Саме ця невідповідність пояснює, чому «гарне» зображення не гарантує «придатної» деталі. Наприклад, зовні коректно надрукований резервуар або каналізована вставка можуть містити замкнену пористість і локальні непровари, що проявляться лише під час герметичних або механічних випробувань. Подібно до цього, деталь із прийнятною геометрією може накопичити залишкові напруження, які призведуть до повзучого викривлення вже в експлуатації. Тому критерій вибору діагностичного методу має задаватися не лише видом дефекту, а й функцією виробу: для прототипування достатнім часто є візуальний контроль плюс контроль стану машини, тоді як для функціональних, герметичних або навантажених вузлів необхідне щонайменше поєднання візуального контролю з неруйнівним методом, а для деталей високої відповідальності - з обов'язковою верифікацією механічними чи матеріалознавчими випробуваннями [7].

Важливо також враховувати, що жоден із наведених альтернативних методів не є універсальним. Мікро-КТ забезпечує найповнішу інформацію про внутрішню структуру, але має високу вартість, обмеження за продуктивністю та часто використовується ex situ (контроль «не на місці»). Активна термографія швидша й дешевша, однак працює через тепловий контраст і тому не завжди однозначно розділяє близькі за масштабом дефекти. Ультразвук чутливий до об'ємних та інтерфейсних порушень, але його інтерпретація залежить від геометрії, товщини та акустичних властивостей полімеру. ОСТ придатна для високороздільного контролю підповерхневих зон, проте її глибина проникнення в FFF-матеріалах обмежена. Сенсори струму, вібрації та акустичної емісії добре вловлюють аномалії стану машини, але не завжди локалізують їх у конкретному об'ємі деталі без моделі процесу або злиття з просторовими даними. Отже, практично правильним є не вибір одного «найкращого» методу, а побудова узгодженого ланцюга спостереження: від дешевого швидкого детектування до повільнішої, але фізично валідної верифікації [3].

Висновки

Стандартний комп'ютерний зір у FDM/FFF-друці є ефективним насамперед для поверхневих, контурних і вже проявлених геометричних дефектів, але його можливості різко звужуються для прихованих об'ємних, інтерфейсних, матеріалозалежних і ранніх машинних відмов. Надійно недоступними для нього залишаються внутрішня пористість без поверхневого прояву, «kissing bonds» (тип дефекту зчеплення, коли поверхні двох шарів (або шару та основи) торкаються одна одної, але не утворюють справжнього, міцного молекулярного або хімічного зв'язку), реальна міжшарова міцність, залишкові напруження до стадії деформації, кристалічність, термодеструкція, вологість філаменту, а також ранні стани закупорки сопла або ковзання подачі. Для цих випадків слід застосовувати інший клас методів: мікро-КТ, активну термографію, ультразвук, ОСТ, електричний контроль, силові, струмові, вібраційні та акустичні сигнали, а для остаточної кваліфікації - механічні та матеріалознавчі випробування. Отже, найкраща стратегія контролю якості FDM/FFF-виробів полягає не в заміні комп'ютерного зору, а в правильному обмеженні сфери його застосування і включенні його до мультимодального контуру контролю [1].

Література

1. Oleff, A., Küster, B., Stonis, M., & Overmeyer, L. (2021). Process monitoring for material extrusion additive manufacturing: A state-of-the-art review. Progress in Additive Manufacturing, 6, 705–730. [Електронний ресурс], Режим доступу: https://doi.org/10.1007/s40964-021-00192-4

2. Moretti, M., Rossi, A., & Senin, N. (2021). In-process monitoring of part geometry in fused filament fabrication using computer vision and digital twins. Additive Manufacturing, 37, 101609. [Електронний ресурс], Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101609

3. Hernandez-Contreras, A., Ruiz-Huerta, L., Caballero-Ruiz, A., Moock, V., & Siller, H. R. (2020). Extended CT Void Analysis in FDM Additive Manufacturing Components. Materials, 13(17), 3831. [Електронний ресурс], Режим доступу: https://doi.org/10.3390/ma13173831

4. Siegel, J. E., Beemer, M. F., & Shepard, S. M. (2020). Automated non-destructive inspection of fused filament fabrication components using thermographic signal reconstruction. Additive Manufacturing, 31, 100923. [Електронний ресурс], Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100923

5. Pellegrino, J., Makila, T., McQueen, S., & Taylor, E. (2016). Measurement science roadmap for polymer-based additive manufacturing. National Institute of Standards and Technology. [Електронний ресурс], Режим доступу: https://doi.org/10.6028/NIST.AMS.100-5

6. Tlegenov, Y., Hong, G. S., & Lu, W. F. (2018). Nozzle condition monitoring in 3D printing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 54, 45–55. [Електронний ресурс], Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.05.010

7. Striemann, P., Huelsbusch, D., Niedermeier, M., & Walther, F. (2021). Application-oriented assessment of the interlayer tensile strength of additively manufactured polymers. Additive Manufacturing, 46, 102095. [Електронний ресурс], Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102095

References

1. Oleff, A., Küster, B., Stonis, M., & Overmeyer, L. (2021). Process monitoring for material extrusion additive manufacturing: A state-of-the-art review. Progress in Additive Manufacturing, 6, 705–730. [Electronic resource], Access mode: https://doi.org/10.1007/s40964-021-00192-4

2. Moretti, M., Rossi, A., & Senin, N. (2021). In-process monitoring of part geometry in fused filament fabrication using computer vision and digital twins. Additive Manufacturing, 37, 101609. [Electronic resource], Access mode:: https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101609

3. Hernandez-Contreras, A., Ruiz-Huerta, L., Caballero-Ruiz, A., Moock, V., & Siller, H. R. (2020). Extended CT Void Analysis in FDM Additive Manufacturing Components. Materials, 13(17), 3831. [Electronic resource], Access mode: https://doi.org/10.3390/ma13173831

4. Siegel, J. E., Beemer, M. F., & Shepard, S. M. (2020). Automated non-destructive inspection of fused filament fabrication components using thermographic signal reconstruction. Additive Manufacturing, 31, 100923. [Electronic resource], Access mode: https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100923

5. Pellegrino, J., Makila, T., McQueen, S., & Taylor, E. (2016). Measurement science roadmap for polymer-based additive manufacturing. National Institute of Standards and Technology. [Electronic resource], Access mode: https://doi.org/10.6028/NIST.AMS.100-5

6. Tlegenov, Y., Hong, G. S., & Lu, W. F. (2018). Nozzle condition monitoring in 3D printing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 54, 45–55. [Electronic resource], Access mode: https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.05.010

7. Striemann, P., Huelsbusch, D., Niedermeier, M., & Walther, F. (2021). Application-oriented assessment of the interlayer tensile strength of additively manufactured polymers. Additive Manufacturing, 46, 102095. [Електронний ресурс], Режим доступу: https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102095