

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ FFF-ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто сучасний стан та перспективи розвитку технології пошарового наплавлення термопластів (FFF – Fused Filament Fabrication). Проаналізовано основні технологічні обмеження, матеріальну базу та напрями підвищення якості виробів. Визначено ключові тенденції розвитку, пов'язані з удосконаленням обладнання, розширенням спектра матеріалів і впровадженням інтелектуальних систем керування процесом друку.

Ключові слова: адитивне виробництво, FFF, 3D-друк, машинний зір, композиційні матеріали, продуктивність.

Abstract

The paper examines the current state and prospects for the development of the technology of layer-by-layer deposition of thermoplastics (FFF – Fused Filament Fabrication). The main technological limitations, material base and directions for improving the quality of products are analyzed. Key development trends associated with the improvement of equipment, expansion of the range of materials and the introduction of intelligent printing process control systems are identified.

Keywords: additive manufacturing, FFF, 3D printing, machine vision, composite materials, productivity.

Вступ

Технологія FFF є однією з найбільш поширених у сегменті адитивного виробництва завдяки низькій вартості обладнання та матеріалів. Типова точність формоутворення для настільних принтерів становить $\pm 0,1\text{--}0,3$ мм, а товщина шару – $0,1\text{--}0,3$ мм, що є достатнім для прототипування, але обмежує застосування у прецизійному машинобудуванні[1]. Продуктивність процесу також залишається відносно низькою: швидкість друку зазвичай не перевищує 50–150 мм/с, що при виготовленні об'ємних деталей призводить до значних витрат часу.

Результати дослідження

Одним із ключових напрямів підвищення продуктивності та якості друку є використання кількох екструдерів. Така система дозволяє швидко змінювати тип матеріалу, що ідеально підходить для друку підтримок, а також значно зменшує кількість відходів філаменту в порівнянні з традиційними однокструдерними системами. Виробники 3D принтерів пропонують різні варіанти виконання такого обладнання, це можуть бути як кілька екструдерів на одній каретці (Bambu Lab H2D) (рис 1.а) або зміна екструдера на інший, що знаходиться на “парковці” (Snapmaker U1) (рис 1.б).

Іншим важливим напрямом є розвиток матеріалів. Використання композиційних філаментів із коротким вуглецевим або скляним волокном дозволяє підвищити модуль пружності виробів у 1,5–3 рази, а межу міцності — до 40–70 % порівняно з базовими полімерами (PLA, ABS). Водночас застосування високотемпературних термопластів (PEEK, PEI) дає змогу отримувати деталі з робочими температурами понад 150–250 °С, що відкриває можливості для їх використання у функціональних вузлах машин[2].

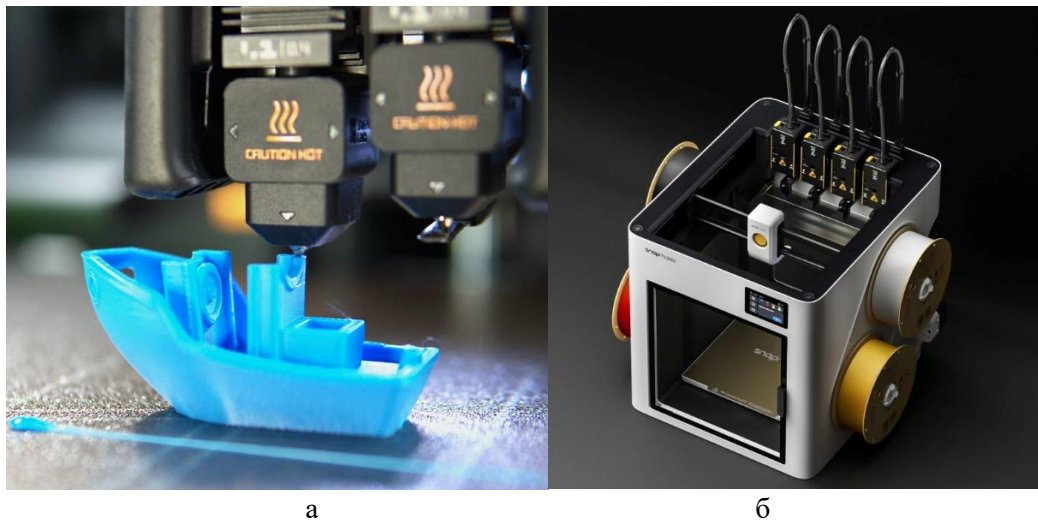


Рисунок 1 – Обладнання для 3D друку з кількома екструдерами

Суттєвим обмеженням FFF залишається анізотропія властивостей: міцність уздовж шарів може бути на 30–50 % нижчою, ніж у площині шару. Для вирішення цієї проблеми активно розробляються методи оптимізації траєкторій укладання та локального підігріву зони наплавлення для покращення міжшарового зчеплення.

Впровадження систем контролю якості на основі машинного зору є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку FFF-технології. Такі системи передбачають використання камер та алгоритмів обробки зображень для безперервного моніторингу процесу друку (рис. 2).

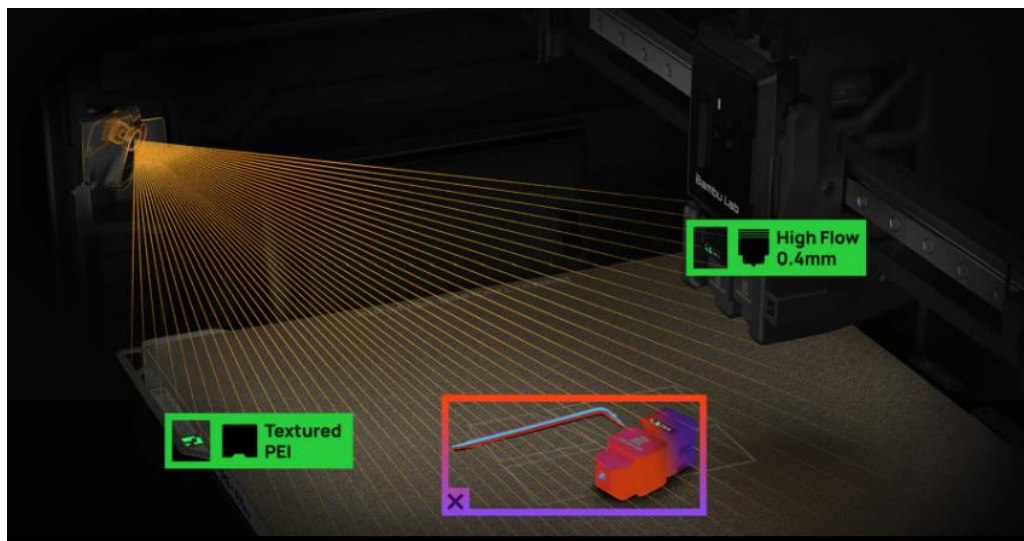


Рисунок 2 – Сканування робочого поля принтера за допомогою камери

Сучасні рішення забезпечують пошаровий контроль виробу з фіксацією кожного шару, що дозволяє формувати повний цифровий архів процесу виготовлення. Аналіз отриманих зображень дає змогу виявляти дефекти, такі як недовострузія, геометричні відхилення та порушення адгезії шарів.

Дослідження показують, що застосування багатокамерних систем із використанням згорткових нейронних мереж дозволяє ідентифікувати до 12 типів дефектів у реальному часі з точністю понад 97 %, при цьому час обробки становить близько 200–250 мс.

Крім того, навіть прості системи на базі однієї камери (наприклад, із частотою 30 кадрів/с) дозволяють здійснювати аналіз геометрії шару та коригування параметрів друку, що сприяє зменшенню браку та підвищенню стабільності процесу[3].

Застосування 3D-камер та структурованого світла дає можливість отримувати високоточні просторові дані (point cloud), що значно підвищує ефективність контролю складних геометричних поверхонь.

Крім того, активно розвиваються гібридні технології, що поєднують FFF із механічною обробкою. Це дозволяє досягати шорсткості поверхні на рівні Ra 1,6–3,2 мкм, що значно розширює сферу застосування таких виробів.

Висновки

Таким чином, розвиток FFF-технології відбувається у напрямі підвищення продуктивності, якості та функціональних характеристик виробів. Найбільш перспективними є багатосоплові системи друку, нові композиційні матеріали, а також інтеграція систем машинного зору та інтелектуального керування процесом.

Застосування зазначених підходів дозволяє суттєво розширити можливості FFF-технології та наблизити її до використання у серійному виробництві функціональних деталей машин.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Parallelized extrusion-based additive manufacturing systems: a review // Additive Manufacturing, Elsevier.
2. Multi-nozzle fused filament fabrication: recent advances and challenges // Journal of Manufacturing Processes.
3. Multi-camera fault detection in fused filament fabrication printing // Additive Manufacturing Letters, 2026.
4. Open-source computer vision-based layer-wise 3D printing analysis // Michigan Tech.

Кудраш Віталій Олександрович – асистент кафедри «Галузеве машинобудування», Вінницький національний технічний університет. e-mail: lisovoy844@gmail.com

Резидент Богдан Сергійович – студент групи ІГМ-236, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: bogdanrez1@gmail.com

Kudrash Vitaliy Alexandrovich – Vitaliy Oleksandrovych Kudrash – Assistant of the Department of Industrial Mechanical Engineering, Vinnytsia National Technical University, e-mail: lisovoy844@gmail.com

Rezydent Bohdan Sergiyovich – student of group IГМ-236, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: bogdanrez1@gmail.com