

УДК 678.017

doi:10.20998/2413-4295.2020.03.04

## АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ FDM ПРИНТЕРІВ ДЛЯ ПРОСТОРОВОГО ДРУКУ ПОЛІМЕРНИМИ ТЕРМОПЛАСТИЧНИМ МАТЕРІАЛАМИ

**В. О. ОЛЕКСИШЕН**

кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, УКРАЇНА  
e-mail: vitaliy.oleksishen@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** У роботі наведено основні параметри сучасного стану світового ринку обладнання адитивного виробництва. Для дослідження обрано найпоширеніший тип адитивної технології, а саме FDM (Fused Deposition Modeling) – формування методом наплавлення або 3Д друк термопластичним полімерним матеріалом. Дана технологія є найпоширенішою та використовується у промисловості, інженерному проектуванні, швидкому прототипуванні, освітньому процесі, наукових дослідженнях, медицині, дизайні тощо. Наведено основні роботи, що розглядають основні характеристики устаткування, систематизують їх за конструктивними особливостями та галузями застосування. Враховуючи недостатнє охоплення типів та конструкцій обладнання у цих роботах, проведено розширений огляд приладів на основі FDM технології. Класифікація обладнання базується на принципі переміщення виконавчих органів, а саме друкувальної головки та робочої платформи 3Д принтера. Виходячи з цього встановлено, що існує чотири основних схеми побудови FDM 3Д принтерів такі, як картезіанська, дельта, полярна та схеми на основі роботизованого маніпулятора. Представлено найбільш популярні моделі 3Д принтерів кожної із схем, розглянуто їхні основні переваги та недоліки, сфери та галузі застосування, приклади виробів, що виготовляються. Огляд показав, що найбільш розповсюдженою схемою як у світі так і в Україні є картезіанська, що в свою чергу поділяється на ряд підвидів. Серед них особливо популярними являються Prusa, CoreXY та H-Bot схеми. Вони є найбільш універсальними, використовують практично всі типи витратного термопластичного матеріалу, включають практично весь необхідний для виробництва ряд типорозмірів робочої зони та є найбільш гнучкими до модернізації. Також показані FDM 3Д принтери на основі роботизованого маніпулятора. Розвиток даного типу устаткування є прикладом впровадження адитивних технологій у серійне автоматизоване виробництво. Аналіз основних сфер застосування та основних переваг та недоліків кожного з типів 3Д принтерів, дало змогу надати рекомендації щодо вибору обладнання для просторового друку залежно від виду діяльності.

**Ключові слова:** 3D принтер; адитивна технологія; просторовий друк; FDM; кінематична схема; полімерні матеріали

## ANALYSIS OF STRUCTURAL FEATURES AND EFFICIENCY OF APPLICATION OF MODERN FDM PRINTERS FOR 3D PRINTING USING POLYMER THERMOPLASTIC MATERIALS

**V. OLEKSYSHEN**

Department of chemical, polymer and silicate engineering, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** This work presents the main parameters of the current state of the world market of additive manufacturing equipment. For research, the most common type of additive technology was chosen, namely FDM (Fused Deposition Modeling) or 3D printing using thermoplastic polymer material. This technology is the most common and is used in industry, engineering design, rapid prototyping, educational process, scientific research, medicine, design and the like. The main works were presented that consider the main characteristics of the equipment, systematize them according to design features and areas of application. Given the insufficient coverage of equipment types and designs in these works, an extensive review of devices based on FDM technology was carried out. The classification of equipment is based on the principle of moving executive bodies, namely the print head and the 3D printer working platform. Based on this, it has been established that there are four main schemes for constructing of 3D printers such as Cartesian, Delta, Polar and schemes based on a robotic manipulator. The most popular models of 3D printers for each of the circuits were given, their main advantages and disadvantages, areas and applications, examples of products manufactured were considered. The review showed that the most widespread in the scheme both in the world and in Ukraine is the Cartesian, which in turn is divided into a number of subspecies. Among them, Prusa, CoreXY and H-Bot schemes are especially popular. They are the most versatile, use almost all types of consumable thermoplastic material, include almost all the range of sizes needed for production of the working area and are the most flexible for modernization. FDM 3D printers based on a robotic arm were also noted. The development of this type of equipment is an example of the introduction of additive technologies in serial automated production. Consideration of the main areas of application and the main advantages and disadvantages of each of the types of 3D printers made it possible to give recommendations on the choice of equipment for spatial printing, depending on the type of activity.

**Keywords:** 3D printer; additive technology; 3D printing; FDM; kinematic scheme; polymeric materials

### Вступ

Конструкційні полімерні композиційні матеріали (ПКМ) [1,2], як термопластичні, так і

реактопластичні, у тому числі модифіковані вуглецевими нанонаповнювачами [3,4], а також так звані інтелектуальні [5–9], з кожним роком знаходять

все ширше застосування у різноманітних галузях науки і техніки, а також у народному господарстві.

Зокрема, можна зазначити їх ефективне використання в аерокосмічній промисловості, авіації, медицині, електроенергетиці, мікроелектроніці, машинобудуванні, військовій промисловості [7] та інших галузях.

Для їх виготовлення використовують цілий спектр технологій та підходів, зокрема, фізико-хімічну модифікацію [8], чисельні методи [9] та методологію структурно-параметричного моделювання [10].

У цьому ряді вирізняється технологія адитивного виробництва або просторового друку, що є такою, що найбільш швидко розповсюджується у світі. Тому на її особливостях слід зупинитись окремо.

Сукупний світовий ринок виробництва технологічного обладнання та надання послуг адитивного виробництва зростає на 30–50% щороку і досяг позначки у 21 млрд. доларів США у 2019 р. Минулого року в світі реалізовано понад 4 млн. пристроїв для просторового друку. Нині на ринку існують десятки великих та сотні малих компаній, що пропонують обладнання для адитивного виробництва.

Близько 90% обсягу продажів становлять пристрої просторового друку (3Д принтери) полімерними термопластичними матеріалами. Таке обладнання базується на технології FDM (Fused Deposition Modeling) або формування методом наплавки. Основою даної технології є пошарове нанесення розплавленого полімерного термопластичного матеріалу згідно цифрової моделі виробу.

Нині на ринку існують сотні моделей обладнання просторового друку, що використовують дану технологію. Кожна з моделей має свої переваги та недоліки і дуже важко зорієнтуватись під час вибору необхідного обладнання. Проте, для кожної з моделей існує ряд спільних конструктивних особливостей, що дозволяє класифікувати існуючі конструкції.

На даний момент існує безліч публікацій, статей, блогів тощо, що розглядають FDM 3Д друк. Проте основна їх частина стосується якогось окремого устаткування і не розглядає обладнання взагалом.

Серед робіт, що мають системний підхід слід відмітити роботу [11]. У ній автор розглядає кінематичні та динамічні характеристики основних типів FDM-принтерів. Проте, ця робота не класифікує існуючі моделі обладнання, відсутній розгляд конструкційно-експлуатаційних недоліків та переваг кожного з типів 3Д принтерів.

У роботі [12] розглянуто основні технології та матеріали, що використовуються у адитивному виробництві. Автор розглядає історію виникнення технології, систематизує термінологію та достатньо глибоко розглядає кожен з підвидів адитивного

виробництва в залежності від витратного матеріалу. Недоліком є те, що не розглянуто особливості видів та пристроїв FDM технології, що є найбільш поширеною.

Це обумовлює проведення аналізу конструктивних особливостей, включаючи кінематичні схеми, та доцільності застосування сучасних FDM-принтерів, призначених для просторового друку полімерних термопластичних матеріалів, у залежності від сфери та об'єктів їх використання, що дасть змогу оптимізувати вибір найбільш доцільних засобів 3Д-друку залежно від поставлених конструкторсько-технологічних завдань.

## Мета роботи

Метою є аналіз конструктивних особливостей, а саме кінематичних схем, переваг, недоліків та доцільності застосування сучасних FDM-принтерів, призначених для просторового друку полімерних термопластичних матеріалів, у залежності від сфери та об'єктів їх використання, що дасть змогу оптимізувати вибір найбільш доцільних засобів 3Д-друку залежно від поставлених конструкторсько-технологічних завдань.

## Виклад основного матеріалу

На даний момент основними типами кінематичних схем сучасних FDM принтерів, що застосовуються при просторовому друці конструктивних виробів з термопластів, є: картезіанські, дельта, полярні та роботизовані кінематичні схеми.

Розглянемо ці типи більш детально.

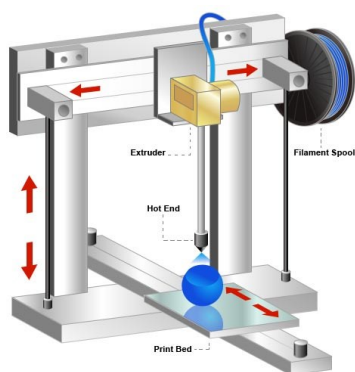
**Картезіанська схема** – це схема при якій основні робочі органи 3Д принтера (друкувальна головка та робоча платформа) пересуваються вздовж взаємоперпендикулярних осей X, Y та Z. Тому таку схему ще називають декартовою, бо всі робочі переміщення пристрою описуються у декартових координатах. Залежно від того вздовж яких з осей переміщуються або навпаки є статичними друкувальна головка та робоча платформа, існують наступні варіанти кінематичних схем 3Д принтера:

**1. Платформа рухається вздовж однієї горизонтальної осі (X або Y), а екструдер по іншій горизонтальній та вертикальній осях Z**

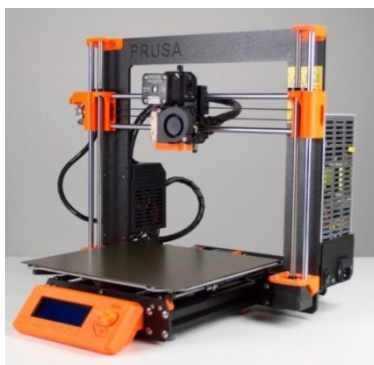
Найпоширенішим представником такої схеми є 3Д принтер Prusa (кінематика Йозефа Пруса) [13]. Дана модель з'явилась на ринку в 2012 р. і з тих пір стала однією з найпопулярніших для любительського користування у світі. 3Д-принтер Prusa дозволяє створювати негабаритні вироби з найбільш популярних типів витратного матеріалу.

Основними перевагами даної моделі та кінематичної схеми загалом являються: простота механіки, відносно низькі вимоги до якості комплектуючих, обслуговування не потребує високої

кваліфікації оператора, відкритий код програмного забезпечення та вільний доступ до всієї конструкторської документації, низька собівартість.



а)



б)

Рис. 1 – FDM 3D принтер конструкції Prusa:  
а) принципова схема; б) модель Prusa MK3S

Серед недоліків особливо необхідно виокремити наступні:

- відкритий корпус призводить до нестабільного градієнта температур робочої зони, внаслідок чого неможливий друк цілою низкою матеріалів;
- рухома робоча платформа зменшує точність позиціонування друкувальної головки та збільшує загальну вібрацію конструкції;
- внаслідок того, що робоча платформа рухома, в більшості випадків її габарити не перевищують 200 мм по всім осям.

## 2. Платформа рухається вздовж вертикальної осі Z, а екструдер у горизонтальній площині по осям X та Y.

Така схема є найбільш популярною як для любительських, так і для професійних 3D принтерів. Головними підвидами даної кінематики є: Makerbot [14], CoreXY [15] та H-Bot [16].

Кінематика Makerbot отримала назву від компанії, що вперше випустила принтер даної схеми [14] (Рис. 2). У такій схемі двигун, що переміщує друкувальну головку вздовж осі X, рухається вздовж осі Y. Робоча платформа кріпиться консольно до осі Z і є незалежною від інших осей. Таке компонування

дає певні переваги: стабільний градієнт робочої зони, закритий корпус дозволяє вести друк більшою кількістю видів розхідного матеріалу. До недоліків відносять:

- двигун (маса стандартного крокового двигуна типу Nema 17 становить 350 г), що переміщує друкувальну головку, значно підвищує інертність, тому максимальна швидкість друку не перевищує 50–70 мм/с;
- відносно висока складність механіки значно підвищує вимоги до якості комплектуючих, обслуговування та кваліфікації оператора;
- консольне кріплення стола обмежує габарити робочої зони.



а)



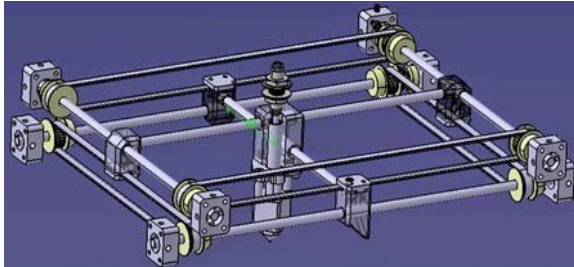
б)

Рис. 2 – FDM 3D принтер конструкції Makerbot:  
а) модель 1-го покоління; б) модель 2-го покоління

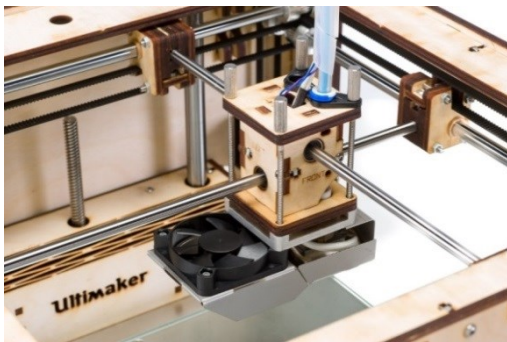
Після виходу на ринок у 2011 р., кінематика Makerbot була найпопулярнішою і використовувалася для виробництва деталей, функціональних прототипів, дизайнерських макетів і т.д. Вона використовувалась у науковій діяльності, інженерному проектуванні та промислового виробництві. Проте згодом з'явилися інші компонування, що мали ряд переваг і поступово почали витісняти кінематику Makerbot.

Кінематика CoreXY (від англ. core – ядро) [15] являється подальшим розвитком кінематики Makerbot [14] (Рис. 2). У цій конструкції відсутній кроковий двигун на рухомій осі. Всі двигуни зафіксовано на

несучій рамі. Друкувальна головка кріпиться на перетині двох взаємоперпендикулярних валів, що фіксуються на осях X та Y. Дана конструкція дає одну з кращих якостей друку, тому є однією з найпопулярніших. Найпоширенішими моделями на ринку є принтери компанії Ultimaker [15] (Рис. 3).



а)



б)

Рис. 3 – Конструкції механіки типу CoreXY: а) 3D модель осей X та Y; б) 3D принтер Ultimaker

На даний момент найдосконалішою конструкцією є схема під назвою H-Bot [16] (Рис. 4). Іноді дану кінематику включають до типу CoreXY, проте вона має ряд принципових відмінностей. Основним є те, що вся система приводиться до руху за допомогою одного зубчатого ременя, що охоплює весь механізм по H-образній траєкторії.

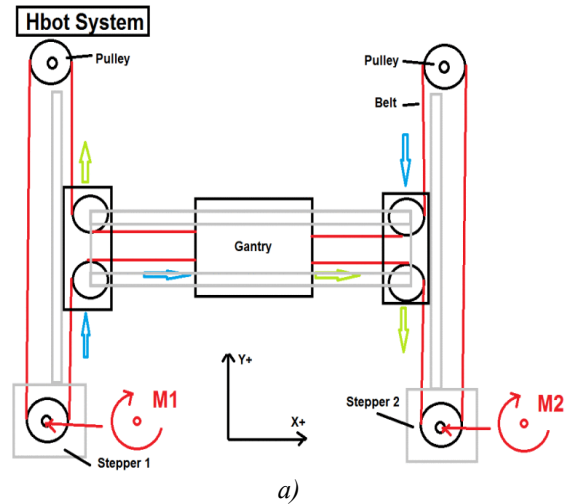
Друкувальна головка знаходиться на рельсовій направляючій або на двох паралельних валах осі X, кінці якої закріплені до направляючих осі Y. Дана схема реалізована у багатьох серійних FDM 3D принтерах, проте найбільш популярна серед кастомних (зібраних власноруч із використанням відкритого коду) принтерів.

Переваги:

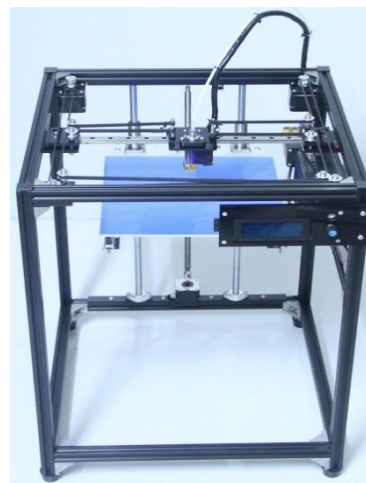
- мінімальна інерція рухомих органів (переміщується тільки друкувальна головка загальною масою зазвичай від 50 до 120 грам);
- стіл рухається по осі Z в закритому корпусі, тому градієнт температур стабільний;
- можливо масштабувати механіку;
- висока точність друку (точність розмірів готового виробу по осям X та Y досягає  $\pm 0,05 - 0,1$  мм) та швидкість друку (низька маса друкувальної головки дозволяє досягати швидкості друку до 120 мм/с).

Недоліки:

- високі вимоги до деталей осей X та Y (допуски валів, матеріали втулок) та максимально допустимого взаємного розташування напрямних валів (кут нахилу у всіх площинах не більше  $90^\circ \pm 10^\circ$ )
- достатньо складна у порівнянні з Makerbot та Prusa конструкція, внаслідок чого складність в обслуговуванні.



а)



б)

Рис. 4 – FDM 3D-принтер з механікою типу H-Bot: а) кінематична схема; б) приклад кастомного пристрою

Переваги кінематики H-Bot по суті є такими ж як і в механіці CoreXY, окрім цього до переваг можна віднести простоту конструкції та обслуговування.

Недоліки:

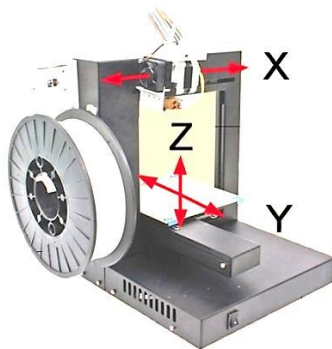
- необхідність використовувати високоякісні рельсові направляючі;
- високі вимоги до жорсткості конструкції осей X та Y, так як при діагональному русі, рухома балка пересувається одним двигуном, що в свою чергу створює перекид і можливе розбалансування конструкції.



Кінематики типів Core XY та H-Bot на даний момент є найбільш популярними у світі, їх використовують як головні виробники серійних 3D принтерів так і окремі інженери для створення кастомного обладнання. Наведені кінематики дозволяють створювати устаткування, що вирішує широкий спектр задач. 3D принтери на базі Core XY та H-Bot використовують у автомобільній, авіабудівній промисловості, інженерних розробках, індустрії розваг, мистецтві. На них виготовляють деталі різних габаритів, функціональні прототипи, тестові зразки, арт-об'єкти і т.д.

### 3. Платформа рухається по одній горизонтальній та вертикальній осі, екструдер – по іншій горизонтальній осі.

Схожа на кінематику Prusa, але платформа рухається ще і по вертикальній осі Z (рис. 5). Дана схема не є достатньо поширеною, по суті єдиною серійною моделлю є принтер UP від компанії PP3DP [17].



а)



б)

Рис. 5 – FDM 3D-принтер UP компанії PP3DP:  
а) модель 1-го покоління; б) модель 2-го покоління з закритим корпусом

#### Переваги:

- переміщення кожної з осей є незалежним;
- можливість збільшувати висоту друку (до 500 мм);
- доволі висока якість друку (точність друку досягає 0,15 мм, а висота шару матеріалу може досягати 150 мк);
- простота в обслуговуванні.

#### Недоліки:

- висока інертність (маса рухомих частин може досягати 1 кг);

- градієнт температури стола непостійний.

Переважно дані принтери використовують для навчальних цілей, вони дають змогу створювати невеликі деталі, що не потребують високої точності виготовлення.

### 4. Платформа нерухома, а екструдер рухається по осям X, Y та Z.

Така компоновка використовується для крупногабаритного друку, коли вага деталі від декількох кілограм, а розміри від 500 мм. Для друку таких деталей навіть мінімальний вплив зміни температурного градієнту є неприпустимим. Дана схема поширена в індустріальному прототипуванні. 3D принтери такої схеми серійно виготовляються компанією Cosine [18] (рис. 6).

#### Переваги:

- градієнт температури максимально стабільний (робоча зона знаходиться в термокамері, що дає змоги чітко підтримувати необхідну температуру від 40 до 100°C);
- можливість друку надвеликих об'єктів (робоча зона складає від 1100\*850\*850 мм);
- загальна низька інерція (переміщується лише друкувальна головка масою менше 1 кг)

#### Недоліки:

- складність механіки та обслуговування;
- висока вартість та експлуатаційні витрати (устаткування коштує від 40 тисяч USD, потребує приміщень промислового призначення).



Рис. 6 – Промисловий FDM 3D-принтер AM1 компанії Cosine

Такі принтери використовують при виробництві повномасштабних функціональних прототипів, для серійного виробництва крупногабаритних деталей складної конфігурації (наприклад турбін приватних електростанцій, корпусних деталей спортивних автомобілів або літаків тощо), оснастки для серійного виробництва (вакуумні та ливникові форми), у мистецтві (статуй, арт-об'єкти) і т.д.

### 5. Платформа рухається по горизонтальним осям X та Y, екструдер рухається по Z.

Основою даної кінематики є те, що робоча платформа рухається вздовж взаємно перпендикулярних осей X та Y, друк відбувається

навколо нерухомого екструдера. Прикладом серійного 3D принтера є проект Tekma 3D [19] (Рис. 7).

Широкого практичного використання така механіка не отримала з ряду очевидних причин: низька якість друку (близько 1 мм), мала робоча зона (до 100\*100\*100 мм), відсутність відкритого коду для програмного забезпечення тощо. Переважно така механіка використовується в приватних невеликих проєктах для дослідження деяких властивостей витратного матеріалу та навчальних цілях.

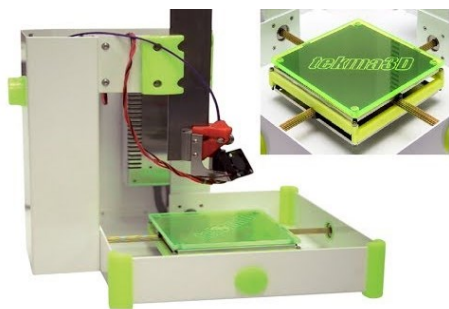


Рис. 7 – FDM 3D-принтер Tekma3D TM1

#### Дельта схема.

Механіка типу Дельта [20] (рис. 8) має нерухомий стіл, а екструдер переміщується за допомогою взаємозалежних направляючих осей XYZ, що в просторі утворюють піраміду-тетраєдр. Для обчислення переміщень використовується тригонометрична функція залежна від кутів конструкції. З однієї сторони це дозволяє точно позиціонувати екструдер, з іншої – невеличке відхилення по одній з осей призводить до загального збою у позиціонуванні.

#### Переваги:

- менша кількість деталей механіки (в середньому на 20-30%);
- більша швидкість друку в порівнянні з класичними картезіанськими схемами (можливо досягти швидкості переміщення друкувальної головки до 200 мм/с);
- відсутність «воблінгу» (періодична нерівномірність шарів по вертикальній осі Z);
- найліпше підходять для друку вертикальних об'єктів;

#### Недоліки:

- більші вимоги до точності деталей механіки (допустиме відхилення геометричних розмірів напрямних до 50 мкм);
- необхідність більш потужної електроніки (потрібно використовувати цифрові плати з 32-бітною архітектурою);
- довгі тяги призводять до неефективного використання осі Z (тяги займають до 40% довжини направляючих).

Прикладами комерційних дельта-принтерів є: Mass Portal D300, 3DQuality Prism Pro Dual, Anet A4 [21-23].

Дельта схему використовують при точному виробництві переважно вертикально орієнтованих деталей. Також така схема добре підходить для серійного виробництва та сфер де необхідно пришвидшити процес 3D друку.

**Полярна схема** являється відносно новою, в якій позиціонування екструдера задається не координатами XYZ, а радіусом та кутом. Платформа в такій схемі кругла, обертається та рухається вздовж горизонтальної осі. Найбільш широко на ринку представлена моделлю компанії Polar [24] (рис. 9).

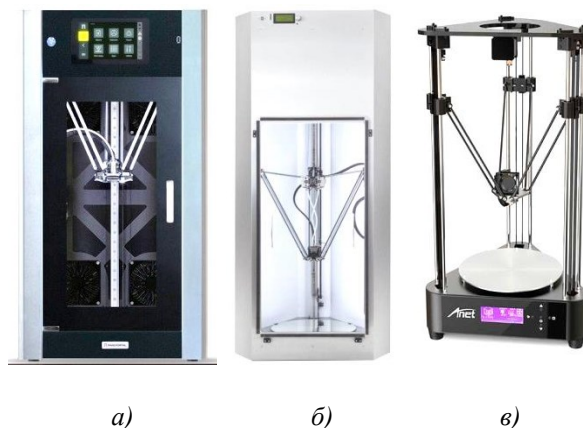


Рис. 8 – Типовий вигляд FDM 3D-принтерів типу Дельта: а) Mass Portal D300; б) 3DQuality Prism Pro Dual; в) Anet A4

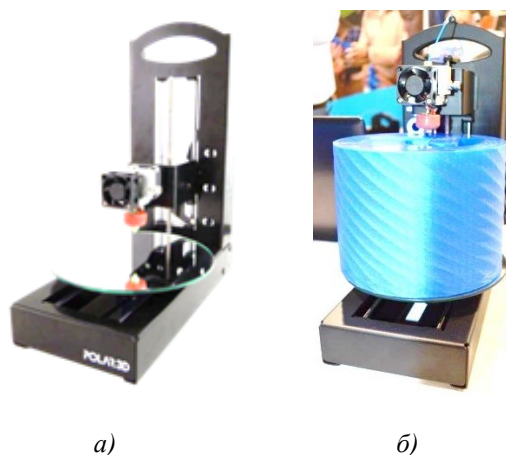


Рис. 9 – FDM 3D-принтер Polar 3D: а) загальний вигляд; б) процес друку

#### Переваги:

- доволі проста механіка;
- простота в обслуговуванні;
- доволі просто масштабувати механіку по вертикальній осі Z (до 500 мм);

Недоліки:

- відносно низька точність друку (відхилення може досягати  $\pm 0,5$  мм);
- нестабільний градієнт робочої зони (коливання температур в межах одного шару можуть досягати  $10^{\circ}\text{C}$ );
- висока інертність (маса рухомих частин досягає 1 кг).

Переважаючими сферами використання є навчання у сфері 3Д друку та дрібносерійне виробництво. Об'єкти формування – дрібногабаритні тіла обертання (вали, втулки, ролики тощо).

#### Схема на основі роботизованого маніпулятора

Являється найбільш сучасною комплексною схемою (Рис. 10, Рис. 11). Вона включає механіку на основі роботизованого маніпулятора на яку кріпиться екструзійна головка.

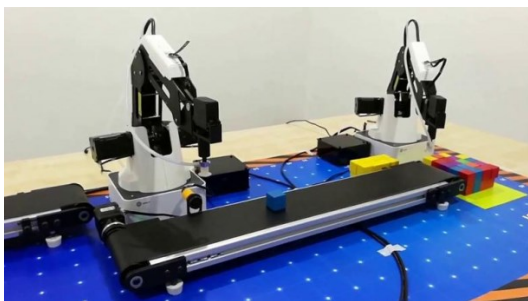


Рис. 10 – Лінія для серійного 3Д друку



Рис. 11 – Портативний багатофункціональний роботизований маніпулятор з можливістю 3Д друку DOBOT M1 [25]

Переваги:

- багатофункціональність, можливо виконувати інші види робіт (лазерну порізку та гравірування, зварювання, складальні операції тощо);
- висока точність (відхилення позиціонування не перевищує  $\pm 10$  мкм);
- велика робоча зона (обмежується довжиною основного прольоту руки маніпулятора);

Недоліки:

- висока вартість та складність у порівнянні з аналогічними 3Д принтерами для промислового використання;
- обслуговування вимагає високої кваліфікації.

Така схема в основному використовується в промисловому виробництві для виготовлення типових або однакових об'єктів.

#### Порівняння основних конструктивних характеристик

Огляд основних конструктивних схем встановив, що основними параметрами, що впливають на якість та ефективність друку, а також на вибір обладнання в залежності від отримуваних виробів, є: точність друку (позиціонування друкувальної головки), рухомість робочої платформи в площині нанесення витратного полімерного матеріалу, габарити зони формування виробів, швидкість переміщення друкувальної головки, складність конструкції та обслуговування, ціна устаткування. Нижче наведено порівняльна оціночна табл. 1 характеристик основних моделей FDM 3Д принтерів кожної з розглянутих схем. Оцінка 1 відповідає низькому, 2 – середньому, а 3 – високому діапазону значень відповідної характеристики.

Таблиця 1 – Порівняльна оцінка основних характеристик FDM 3Д принтерів основних кінематичних схем

	Точність друку (позиціонування)	Рухомість стола по X та Y	Розмір робочої зони	Швидкість друку	Складність конструкції	Обслуговування	Ціна
Prusa i3	2	+	1	2	1	1	1
Makerbot	2	-	2	2	2	2	2
Ultimaker	2	-	2	2	2	2	2
H-Bot Cust	3	-	3	2	2	2	2
PP3DP	2	+	1	2	1	1	1
AM1	3	-	3	3	3	3	3
Tekma 3D	1	+	1	1	2	2	1
Anet A4	3	-	2	3	3	3	2
Polar 3D	2	-	1	2	2	2	1
Dobot M1	3	-	3	2	3	3	3

#### Висновки

Проаналізовані конструктивні особливості, переваги та недоліки застосування сучасних FDM-принтерів, призначених для просторового друку полімерних термопластичних матеріалів, у залежності від сфери та об'єктів їх використання.

Зокрема, було встановлено, що існує 4 основні схеми FDM 3Д принтерів, а саме: картезіанська, дельта, полярна та на основі роботизованого маніпулятора. Кожна зі схем включає десятки та сотні моделей від різних виробників обладнання адитивної індустрії світу.

Беззаперечним світовим лідером є картезіанська схема, що об'єднує ряд підвидів, серед яких в свою чергу найпопулярніші такі схеми як Prusa, Core-XY та H-Bot. Загальна світова частка їх складає близько 80% у загальній кількості працюючих FDM 3D принтерів. Пристрої цих схем найбільш якісні та ефективні, вони використовуються як для приватних цілей, так і у промисловому виробництві (інженерному проектуванні, авіа- та автомобілебудуванні, електроніці, будівництві тощо), дизайні та мистецтві. На них виготовляють вироби різних типорозмірів та з широкого спектру термопластичних матеріалів.

Дельта схема також доволі популярна та займає близько 5–7% світового ринку. Вона є незамінною в тих випадках, коли необхідна висока продуктивність і при цьому достатня точність адитивного виробництва.

Полярна схема найновіша, проте не отримала широкого практичного поширення. На даний час вона лишається предметом досліджень вчених та інженерів. Проте подальший розвиток полярної схеми можливо покращить її поширеність та використання у промисловості.

Схема на основі роботизованого маніпулятора є яскравим прикладом впровадження технології FDM 3D друку для серійного виробництва. Вона незамінна при масовому виробництві деталей, що не можуть бути виготовлені класичними методами обробки.

При цьому технологія FDM 3D друку інтенсивно розвиваються і створюються нові типи та види обладнання. Це дає напрямки подальших досліджень для вибору найбільш доцільних засобів 3D-друку у залежності від поставлених конструкторсько-технологічних завдань та сфери використання засобів просторового друку.

Встановлено основні параметри, що є визначальними при виборі FDM 3D принтерів, та наведено зведену таблицю оцінок кожної з характеристик для принтерів основних кінематичних схем. Виходячи з цього, основою подальших досліджень є розробка методики визначення абсолютних значень впливу кожної з характеристик на якість та ефективність використання кожного з типів FDM 3D принтерів залежно від необхідних характеристик отримуваних виробів.

#### Список літератури

- Xiao-Su Yi, Shanyi Du, Litong Zhang, (eds.). Composite Materials Engineering. *Fundamentals of Composite Materials*. Springer, Singapore. 2018. Vol. 1. doi: 10.1007/978-981-10-5696-3.
- Vasiliev V. V., Morozov E. V. *Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures*. 4th ed. Elsevier. 2018. doi: 10.1007/620-982-10-5696-3.
- Kolosov A. E. Preparation of Nano-Modified Reactoplast Polymer Composites. Part 1. Features of used nanotechnologies and potential application areas of nanocomposites. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2015. Vol. 51 (7-8), pp. 569-573. doi: 10.1007/s10556-015-0088-y.
- Kolosov A. E. Preparation of Reactoplast Nano-Modified Polymer Composites. Part 5. Advantages of using nano-modified structural carbon-fiber composites. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. Vol. 52 (9-10), pp. 721-725. doi: 10.1007/s10556-017-0259-0.
- Ivitskiy I., Sivetskiy V., Bazhenov V., Ivitska D. Modeling the electrostatic control over depth of the introduction of intelligent sensors into a polymer composite material. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1. no. 5 (85). pp. 4-9. doi: 10.15587/1729-4061.2017.91659.
- Sivetskiy V. I., Khalimovskiy O. M., Sokolskiy O. L., Ivitskiy I. I. Automation of intelligent sensor injection inlet in polymer moldings by using vector controlled electric drive In: *Proceedings of the IEEE 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON '17)*, IEEE. Kiev, 2017, pp. 534-537. doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100297.
- Benzait Zineb, Trabzon Levent. A review of recent research on materials used in polymer–matrix composites for body armor application. *Journal of Composite Materials*, 2018, Publ. March 14. doi: 10.1177/002198318764002.
- Kolosov A. E., Sivetskiy V. I., Kolosova E. P., Vanin V. V., Gondlyakh A. V., Sidorov D. E., Ivitskiy I. I. Creation of Structural Polymer Composite Materials for Functional Application Using Physicochemical Modification. *Advances in Polymer Technology*, 2019. 12 p. doi: 10.1155/2019/3501456.
- Sakharov A. S., Kolosov A. E., Sivetskiy V. I., Sokolskiy A. L. Modeling of Polymer Melting Processes in Screw Extruder Channels. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2013, Vol. 49 (5-6), pp. 357-363. doi: 10.1007/s10556-013-9755-z.
- Kolosov A. E., Virchenko G. A., Kolosova E. P., Virchenko G. I. Structural and technological design of ways for preparing reactoplast composite fiber materials based on structural parametric modeling. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2015. Vol. 51 (7-8). P. 493-500. doi: 10.1007/s10556-015-0075-3.
- Borelli V. *Kinematic and dynamic analysis of a machine for additive manufacturing*. Torino, 2018. 113 p. doi: 10.3390/machines5040029.
- Hejtmánek M. *Additive Manufacturing Technologies Utilization in Process Engineering*. Prague, 2017. doi: 10.1007/s00170-015-7077-3.
- Prusa research. URL: <https://www.prusa3d.com/> (дата звернення 09.02.2020).
- MakerBot Industries. URL: <https://www.makerbot.com/> (дата звернення 09.02.2020).
- Ultimaker BV. URL: <https://ultimaker.com/> (дата звернення 09.02.2020).
- Weikert S., Ratnaweera R., Zirn O., Wegener K. Modeling and measurement of H-Bot kinematic systems. *Swiss Federal Institute of Technology*. ETH. Zurich. 2010.
- Professional printing. URL: <http://www.pp3dp.com/> (дата звернення 09.02.2020).
- Cosine. URL: <https://www.cosineadditive.com/> (дата звернення 09.02.2020).
- Fabbaloo. 3d printing news. URL: <https://www.fabbaloo.com/blog/2014/7/2/the-tekma3d-tm1-3d-printer> (дата звернення 09.02.2020).
- What is a Delta 3D Printer? – Simply Explained. URL: <https://all3dp.com/2/what-is-a-delta-3d-printer-simply-explained/> (дата звернення 09.02.2020).



21. Mass Portal D300. URL: <https://www.3d-tulostus.fi/Mass-Portal-D300/en> (дата звернення 09.02.2020).
  22. Prism Pro Dual 3D Quality. URL: <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/3dquality-prism-pro-dual/> (дата звернення 10.02.2020).
  23. A4 (Kit) Anet. URL: <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/anet-a4-kit/> (дата звернення 11.02.2020).
  24. The #1 platform and marketplace for 3D printing in education. URL: <https://polar3d.com/> (дата звернення 11.02.2020).
  25. DOBOT M1 SCARA Collaborative Robot Arm. URL: <https://www.dobot.cc/dobot-m1/product-overview.html> (дата звернення 11.02.2020).
9. Sakharov A. S., Kolosov A. E., Sivetskii V. I., Sokolskii A. L. Modeling of Polymer Melting Processes in Screw Extruder Channels. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2013, Vol. 49 (5-6), pp. 357-363. doi: 10.1007/s10556-013-9755-z.
  10. Kolosov A. E., Virchenko G. A., Kolosova E. P., Virchenko G. I. Structural and technological design of ways for preparing reactoplastic composite fiber materials based on structural parametric modeling. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2015, Vol. 51 (7-8), pp. 493-500, doi: 10.1007/s10556-015-0075-3.
  11. Borelli V. *Kinematic and dynamic analysis of a machine for additive manufacturing*. Torino, 2018, p. 113, doi: 10.3390/machines5040029.
  12. Hejtmanek M. *Additive Manufacturing Technologies Utilization in Process Engineering*, Prague, 2017, doi: 10.1007/s00170-015-7077-3.
  13. Prusa research. Available at: <https://www.prusa3d.com/> (accessed 09.02.2020).
  14. MakerBot Industries. Available at: <https://www.makerbot.com/> (accessed 09.02.2020).
  15. Ultimaker BV. Available at: <https://ultimaker.com/> (accessed 09.02.2020).
  16. Weikert S., Ratnaweera R., Zirn O., Wegener K. Modeling and measurement of H-Bot kinematic systems. *Swiss Federal Institute of Technology, ETH, Zurich*, 2010.
  17. Professional printing. Available at: <http://www.pp3dp.com/> (accessed 09.02.2020).
  18. Cosine. Available at: <https://www.cosineadditive.com/> (accessed 09.02.2020).
  19. Fabbaloo. 3d printing news. Available at: <https://www.fabbaloo.com/blog/2014/7/2/the-tekma3d-tm1-3d-printer> (accessed 09.02.2020).
  20. What is a Delta 3D Printer? – Simply Explained. Available at: <https://all3dp.com/2/what-is-a-delta-3d-printer-simply-explained/> (accessed 09.02.2020).
  21. Mass Portal D300. Available at: <https://www.3d-tulostus.fi/Mass-Portal-D300/en> (accessed 09.02.2020).
  22. Prism Pro Dual 3D Quality. Available at: <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/3dquality-prism-pro-dual/> (accessed 10.02.2020).
  23. A4 (Kit) Anet. Available at: <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/anet-a4-kit/> (accessed 11.02.2020).
  24. The #1 platform and marketplace for 3D printing in education. Available at: <https://polar3d.com/> (accessed 11.02.2020).
  25. DOBOT M1 SCARA Collaborative Robot Arm. Available at: <https://www.dobot.cc/dobot-m1/product-overview.html> (accessed 11.02.2020).

### References (transliterated)

1. Xiao-Su Yi, Shanyi Du, Litong Zhang, (eds.). *Composite Materials Engineering. Fundamentals of Composite Materials*. Springer, Singapore, 2018, Vol. 1, doi: 10.1007/978-981-10-5696-3.
2. Vasiliev V. V., Morozov E. V. *Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures*. 4th ed. Elsevier, 2018, doi: 10.1007/620-982-10-5696-3.
3. Kolosov, A.E. Preparation of Nano-Modified Reactoplast Polymer Composites. Part 1. Features of used nanotechnologies and potential application areas of nanocomposites. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2015, Vol. 51 (7-8), pp. 569-573, doi: 10.1007/s10556-015-0088-y.
4. Kolosov, A.E. Preparation of Reactoplastic Nano-Modified Polymer Composites. Part 5. Advantages of using nano-modified structural carbon-fiber composites. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2017, Vol. 52 (9-10), pp. 721-725, doi: 10.1007/s10556-017-0259-0.
5. Ivitskiy, I., Sivetskiy, V., Bazhenov, V., Ivitska, D. Modeling the electrostatic control over depth of the introduction of intelligent sensors into a polymer composite material,” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, Vol.1, no. 5 (85), pp. 4-9, doi: 10.15587/1729-4061.2017.91659.
6. Sivetskyy V. I., Khalimovskyy O. M., Sokolskyy O. L., Ivitskiy I. I. Automation of intelligent sensor injection inlet in polymer moldings by using vector controlled electric drive In: *Proceedings of the IEEE 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON '17)*, IEEE, Kiev, 2017, pp. 534-537, doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100297.
7. Benzait Z., Trabzon L. A review of recent research on materials used in polymer–matrix composites for body armor application. *Journal of Composite Materials*, 2018, publ. March 14, doi: 10.1177/002198318764002.
8. Kolosov A. E., Sivetskii V. I., Kolosova E. P., Vanin V. V., Gondlyakh A. V., Sidorov D. E., Ivitskiy I. I. Creation of Structural Polymer Composite Materials for Functional Application Using Physicochemical Modification. *Advances in Polymer Technology*, 2019, p. 12, doi: 10.1155/2019/3501456.

### Відомості про авторів (About authors)

**Олексішен Віталій Олександрович** – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», аспірант кафедри хімічного полімерного та силікатного машинобудування, Київ, Україна; e-mail: [vitaliy.oleksishen@gmail.com](mailto:vitaliy.oleksishen@gmail.com).

**Vitalii Oleksyshen** – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, postgraduate student of the department of chemical, polymer and silicate engineering, Kyiv, Ukraine; e-mail: [vitaliy.oleksishen@gmail.com](mailto:vitaliy.oleksishen@gmail.com).

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Олексишен В. О. Аналіз конструктивних особливостей та ефективності застосування сучасних FDM принтерів для просторового друку полімерними термопластичними матеріалами. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 1 (3). С. 25-34. doi:10.20998/2413-4295.2020.03.04.

*Please cite this article as:*

Oleksyshen V. Analysis of structural features and efficiency of application of modern FDM printers for 3D printing using polymer thermoplastic materials. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 1 (3), pp. 25-34, doi:10.20998/2413-4295.2020.03.04.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Олексишен В. А. Анализ конструктивных особенностей и эффективности применения современных FDM принтеров для пространственной печати полимерными термопластичными материалами. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 1 (3). С. 25-34. doi:10.20998/2413-4295.2020.03.04.

**АННОТАЦИЯ** В работе приведены основные параметры современного состояния мирового рынка оборудования аддитивного производства. Для исследования выбран самый распространенный тип аддитивной технологии, а именно FDM (Fused Deposition Modeling) – формирование методом наплавки или 3D печать термопластичным полимерным материалом. Данная технология является самой распространенной и используется в промышленности, инженерном проектировании, быстром прототипировании, образовательном процессе, научных исследованиях, медицине, дизайне и тому подобном. Были приведены основные работы, которые рассматривают основные характеристики оборудования, систематизируют их по конструктивным особенностям и областям применения. Учитывая недостаточный охват типов и конструкций оборудования в этих работах, было проведено расширенный обзор приборов на основе FDM технологии. Классификация оборудования базируется на принципе перемещения исполнительных органов, а именно печатающей головки и рабочей платформы 3D принтера. Исходя из этого установлено, что существует четыре основные схемы построения FDM 3D принтеров – такие, как картезианская, дельта, полярная и схемы на основе роботизированного манипулятора. Были приведены наиболее популярные модели 3D принтеров каждой из схем, рассмотрены их основные преимущества и недостатки, сферы и области применения, примеры изготавливаемых изделий. Обзор показал, что наиболее распространенной схемой, как в мире, так и в Украине является картезианская, которая в свою очередь делится на ряд подвидов. Среди них особенно популярными являются Prusa, CoreXY и H-Bot схемы. Они являются наиболее универсальными, используют практически все типы расходного термопластичного материала, включают практически весь необходимый для производства ряд типоразмеров рабочей зоны и являются наиболее гибкими к модернизации. Также были рассмотрены FDM 3D принтеры на основе роботизированного манипулятора. Развитие данного типа оборудования является примером внедрения аддитивных технологий в серийное автоматизированное производство. Рассмотрение основных сфер применения и основных преимуществ и недостатков каждого из типов 3D принтеров, позволило дать рекомендации к выбору оборудования для пространственной печати в зависимости вида деятельности.

**Ключевые слова:** 3D-принтер; аддитивная технология; пространственная печать; FDM; кинематическая схема; полимерные материалы

*Надійшла (received) 14.02.2020*