

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ВДОСКОНАЛЕННЯ 3D-ДРУКУ ОБЕРТОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ МЕТОДОМ FDM

¹Michał Bembenek, ¹Wojciech Gazda, ²В. В. Михайлюк, ²О. О. Рудейченко, ²Р. О. Дейнега

¹AGH Науково-технічний університет, Краків, алея Міцкевича 30, 30-059 Краків, Польща,
e-mail: b e m b e n e k @ a g h . e d u . p l

²ІФНТУНГ; м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15,
e-mail: a d m i n @ n u n g . e d u . u a

Методи швидкого прототипування є новою областю розвитку виробничих процесів. Їх широке застосування дозволяє усунути конструктивні помилки або знизити собівартість продукції. Одним з методів швидкого прототипування є адитивні технології виготовлення виробів, прикладом яких є 3D-друк. 3D-друк деталей – відносно нова технологія виготовлення деталей машин, але вона швидко розвивається. Ця технологія знаходить застосування практично у всіх галузях промисловості, і все більша кількість методів й рішень для виготовлення принтерів сприяє підвищенню точності та якості виробленої продукції. Сьогодні на ринку існує безліч різних технологій 3D-друку. Проте найпопулярнішим є FDM-друк, принцип якого полягає у видавлюванні термопластичного матеріалу через нагріте сопло. Принтери цього типу мають екструдер, який вмищує нагріту нитку, та рухається одночасно відносно осі декартової системи. Проте у результаті такого процесу створюються вироби, округлі форми яких характеризуються малою точністю виконання. З метою підвищення точності виготовлення округлих форм виробів запропоноване інноваційне рішення, яке сьогодні ніде не використовується і є предметом науково-дослідницької статті. Воно полягає у модернізації 3D-принтера Anet A8, що випускається серійно. До його конструкції додано обертальну вісь, що утримується трикулачковим патроном. Також для цього принтера для приводу обертання осі було підбрано кроковий двигун. Також було за допомогою встановлення додаткових елементів підвищено жорсткість конструкції 3D-принтера. Всі перелічені заходи привели до підвищення точності виготовлення виробів, таких як вали або диски. Проведено тестовий друк виробів типу «валик», за результатами аналізу яких встановлено параметри друку, від яких залежить якість отримуваних поверхонь. Наведено і недоліки запропонованого способу друку, можливі способи їх усунення та описано подальші плани розвитку.

Ключові слова: 3D принтер, 3D друк, FDM, обертова вісь, модернізація 3D принтера, принтер Anet A8.

Rapid prototyping methods represent new areas for the development of manufacturing processes. Their extensive use makes it possible to eliminate design errors or reduce the cost of production. One of the methods of rapid prototyping is additive manufacturing technologies, an example of which is 3D printing. 3D printing of parts is a relatively new technology for manufacturing machine parts, but it is rapidly developing. This technology finds application in almost all industries, and an increasing number of methods and solutions for the manufacture of printers contribute to improving the accuracy and quality of manufactured products. There are many different 3D printing technologies on the market today. However, the most popular is FDM printing, the principle of which is to extrude a thermoplastic material through a heated nozzle. Printers of this type have an extruder, which contains a heated filament, and moves simultaneously with respect to the axis of the Cartesian system. However, as a result of such a process, products are created, the rounded shapes of which are characterized by low accuracy. In order to improve the accuracy of manufacturing rounded shapes of products, an innovative solution has been proposed, which is not used anywhere today and is the subject of a research article. It consists in upgrading a mass-produced 3D printer. For this, the traditional 3D printer Anet A8 was upgraded. A rotating axle was added to its design, held by a three-jaw chuck. Also for this printer, a stepper motor was selected to drive the rotation of the axis. Also, by installing additional elements, the rigidity of the 3D printer design has been increased. All these measures have led to an increase in the accuracy of manufacturing products, such as shafts or disks. Test printing of products of the "roller" type was carried out, according to the results of the analysis of which the printing parameters were set, on which the quality of the resulting surfaces depends. The shortcomings of the proposed printing method are also given, possible ways to eliminate them and further development plans are described.

Key words: 3D printer, 3D printing, FDM, rotating axis, 3D printer upgrade, Anet A8 printer.

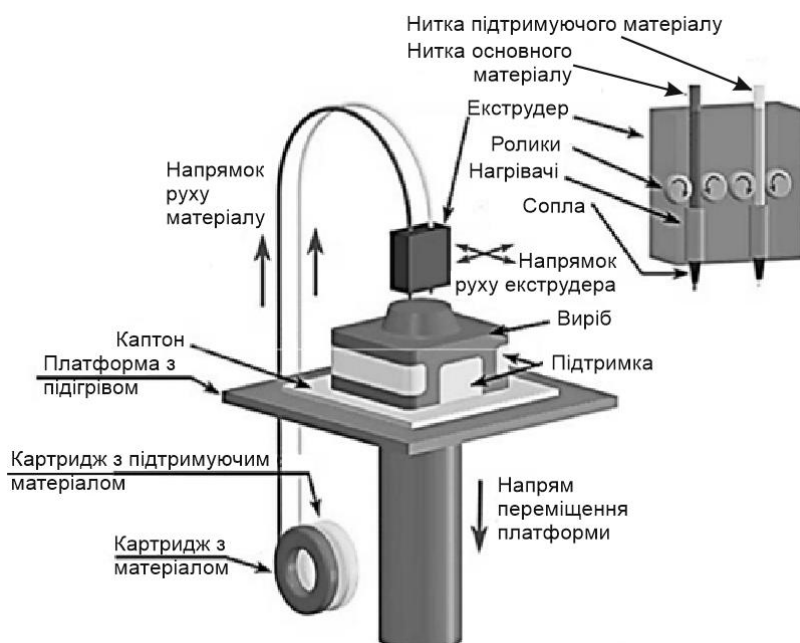


Рисунок 1 – Схема реалізації 3D-друку за технологією FDM

Вступ

Розвиток промисловості та технологій сьогодні прискорюється. Це призводить до того, що виробники змушені постійно вдосконалювати виробничі методи і знижувати виробничі витрати. З початку ХХ століття відбулося значне збільшення точності обробки виробів, а точність вимірювань підвищилась майже в 4 рази. Причиною цього також є розвиток методів формування виробів, які включають автоматизацію процесів із використанням 3D-принтерів та верстатів з числовим програмним керуванням. 3D-друк – технологія, за допомогою якої вироби формуються із почергово укладених шарів філаменту на основі попередньо створених тривимірних моделей. Застосування 3D-принтерів дозволило скоротити витрати і час на виробництво прототипів.

Мета роботи полягає у вдосконаленні способу виготовлення виробів типу «вали» та «диски» за технологією 3D-друку та модернізації для цього 3D-принтера Anet A8.

Аналіз закордонних та вітчизняних досліджень і публікацій

Технології і проблеми 3D-друку

Перевагою сучасних технологій проєктування та виготовлення виробів є їх швидкість та економічність. Вони дозволяють значно спростити роботу із 3D-моделями, створювати об'єкти унікальних геометричних

форм різної складності. Сьогодні існує кілька методів швидкого прототипування, які будуть обговорюватися далі [1-3].

Технологія FDM (Fused Deposition Modeling)

Використовується для друку пластикова нитка, яку пропускають через екструдер і нагрівають до температури плавлення. Відтак наносять її рівномірно (шляхом екструзії) шар за шаром, створюючи у такий спосіб потрібний 3D-об'єкт відповідно до CAD-файлу (формат STL). Одна з можливих схем реалізації 3D-друку методом FDM зображена на рисунку 1. Екструдер може переміщатися вздовж осей координат x і y , а платформа – вздовж осі z за допомогою механізму з числовим керуванням, який керується безпосередньо програмою САМ принтера під час нагрівання нитки, що проходить через нього. Далі відбувається нанесення тонких шарів розплавленої нитки, які під час охолодження твердіють і зливаються один з одним [4, 5]. Для 3D-друку моделей складної геометрії або консольних моделей необхідно створювати підкладку, яку потрібно буде видаляти вручну після завершення друку.

Технологія SLA

SLA-технологія (стереолітографія) також відома як «фотозатвердіння» або «оптичне виготовлення». Як і у випадку технології FDM, перед друком 3D-об'єкт потрібно розділити на шари за допомогою спеціального програмного забезпечення. Під час друку лазерний промінь рухається за створеною траєкторією по одному

шару на поверхні смоли та, контактуючи із нею в посудині для друку, спричинює твердіння шару. Далі процес повторюється на наступному шарі [4, 5] (рис. 2). Після друку виріб необхідно пропустити через окрему хімічну ванну, щоб видалити надлишки смоли. Для остаточного твердіння модель поміщають у піч з ультрафіолетовим випромінюванням [6].

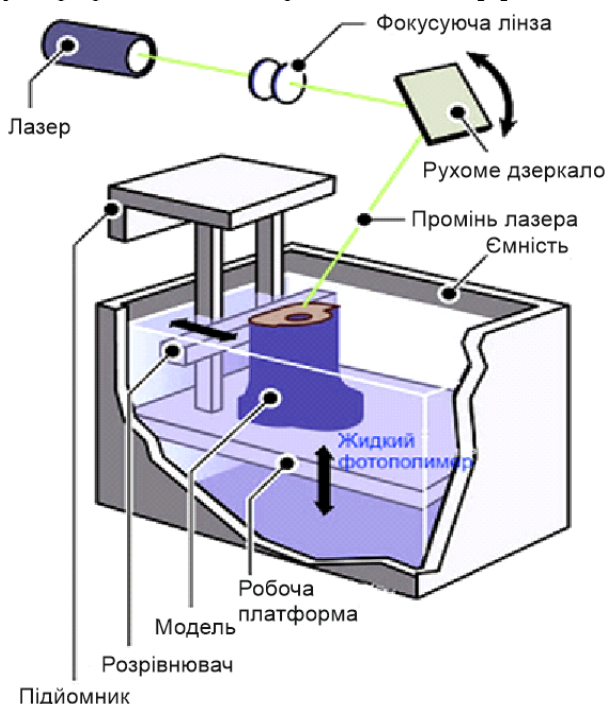


Рисунок 2 – Схема реалізації 3D-друку за технологією SLA

Як і у випадку з технологією FDM, SLA також потребує створення опорних конструкцій щоб підтримувати об'єкт на ділянках без основи. Смоли, що залишилися в ємності для

друку, можна використовувати для 3D-друку наступного виробу. Недоліками цієї технології є те, що надруковані вироби після тривалого перебування на сонці стають крихкими і ламкими, а також під час процесу друку необхідно забезпечити рівномірність покриття шару фотополімером безпосередньо перед початком затвердіння наступного шару [6].

Технологія SLS

SLS, або Selective laser Sintering, полягає в тому, що шари порошку наносяться на робочий стіл, де послідовно твердіють завдяки променям лазера. Дана технологія використовує керамічні матеріали і метали (сталь, бронзу). Схема процесу подана на рисунку 3. Порошкоподібний матеріал наноситься тонким шаром, який рівномірно розподіляється по всій площі друку. Послідовно на порошок спрямовується промінь високоенергетичного лазера. Це призводить до локального нагрівання порошку до температури, яка забезпечує його плавлення і з'єднання з розміщеними нижче шарами [5, 7, 8]. Недоліками цієї технології є висока вартість витратних матеріалів і устаткування.

Технологія CJP (Color jet Printing)

Ця технологія дозволяє друкувати багатобарвні елементи в межах, доступних для принтерів CMYK. Технологія CJP дуже схожа до технології друку SLS. Тут також використовується порошок як конструктивний матеріал, який послідовно розподіляється на шари. Проте порошок не спікається під дією променя лазера, а затвердіває завдяки

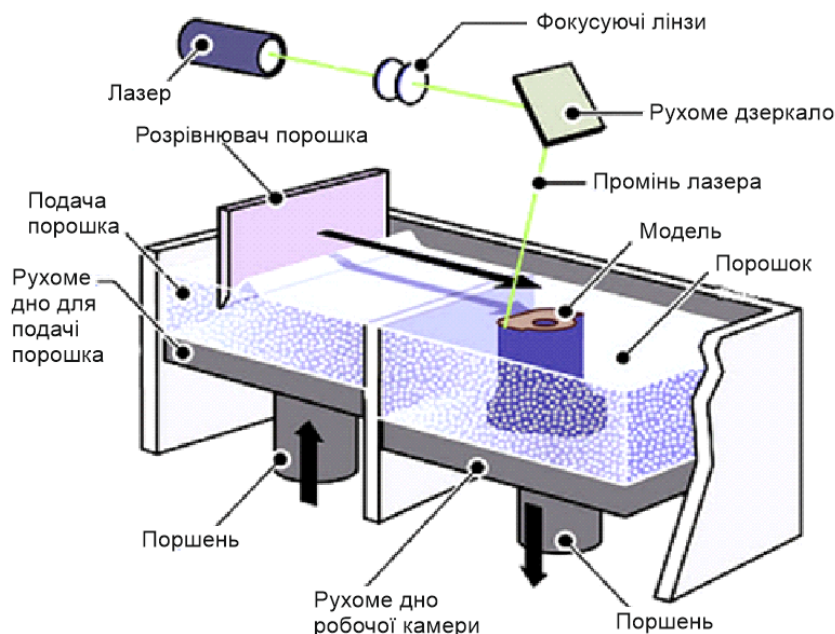


Рисунок 3 – Схема реалізації 3D-друку за технологією SLS

точковому додаванню сполучної речовини, яка склеює порошок (рис. 4). Друк проводиться за допомогою друкуючої головки, конструкція якої аналогічна стандартній струменевій головці принтера [4, 5].

Макет додавання наступного шару будівельного блоку

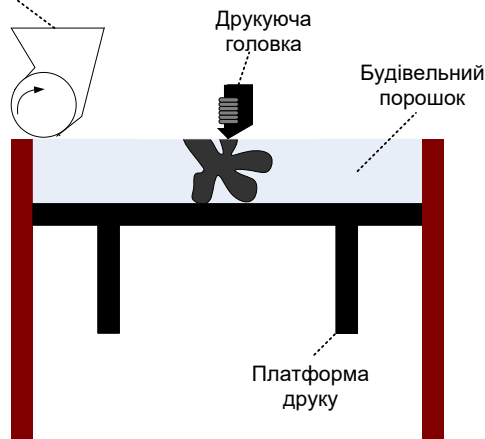


Рисунок 4 – Схема реалізації 3D-друку за технологією SJP

Викладення основного матеріалу

Проблеми 3D-друку та можливе їх вирішення

Сьогодні принтери типу FDM є найпоширенішими і використовуються безліччю компаній для виготовлення виробів різної конфігурації та призначення [9]. Основними проблемами технології FDM є:

1) спотворення надрукованого виробу в результаті усадки матеріалу в процесі його формування. Через велику усадку виготовлювана деталь погано прилипає до поверхні робочої платформи, а також деформується в процесі виготовлення. Для вирішення цієї проблеми використовують різноманітні 3D-клеї та 3D-скотчі. Також необхідно використовувати принтер із робочим столом, що має можливість підігріву. Бажано також використовувати принтери із закритим корпусом.

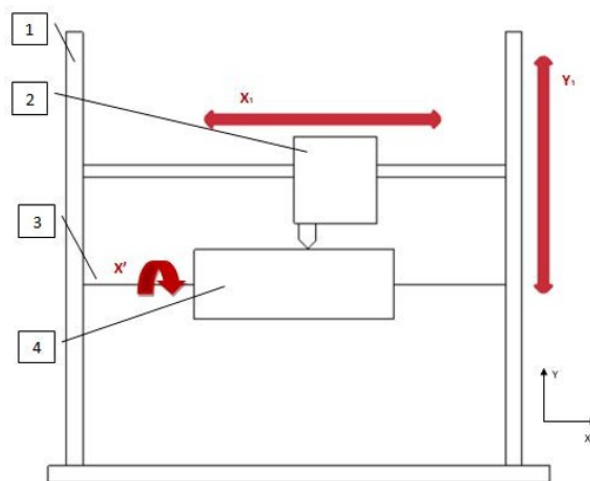
2) необхідність розміщення першого шару виготовлюваної деталі безпосередньо на столі принтера. Через невеликі габарити робочого столу деталь може виходити за його межі. Тому для друку необхідно встановлювати спеціальні опори, щоб збільшити площу робочого столу.

3) складність у виготовленні форм обертових елементів, тобто важко отримати форми з округлими стінками. Приклад виготовленої деталі з такими формами наведено на рис. 5 [10].

Для вирішення проблеми виготовлення деталей округлої форми був розроблений спосіб, при якому осі X і Y – це напрямки, в яких рухається екструдер, а X' – вісь обертання моделі, на якій згідно з технологією FDM нитка буде наноситися пошарово. Модифікована схема зображена на рисунку 6. При використанні представленого принтера вісь, що обертається, буде відповідати тим же цілям, що і рухомий стіл у звичайному принтері. Робота принтера буде аналогічна роботі токарного верстата. Еквівалентом різця буде екструдер. За кожною подачею екструдера на обертову вісь буде нанесений ще один шар матеріалу. Після його розміщення елемент повернеться у вихідне положення і буде нанесено наступний шар матеріалу. Цикл буде повторюватися до отримання необхідної форми виробу.



Рисунок 5 – Куля, надрукована за технологією FDM [9, 10]



1 – рама, 2 – екструдер,
3 – вісь, що обертається, 4 – друкований виріб
Рисунок 6 – Схема 3D-принтера з обертовою віссю

Таким чином, пристрій буде використовуватися для друку валів, втулок, осей та інших деталей округлої форми. Ці

компоненти часто є основними деталями багатьох машин практично з усіх галузей промисловості. Додатковою перевагою, яка збільшує область використання принтера, є

Точність друку	± 0.1 мм
Швидкість друку	50 мм/с
Загальна потужність	180 Вт

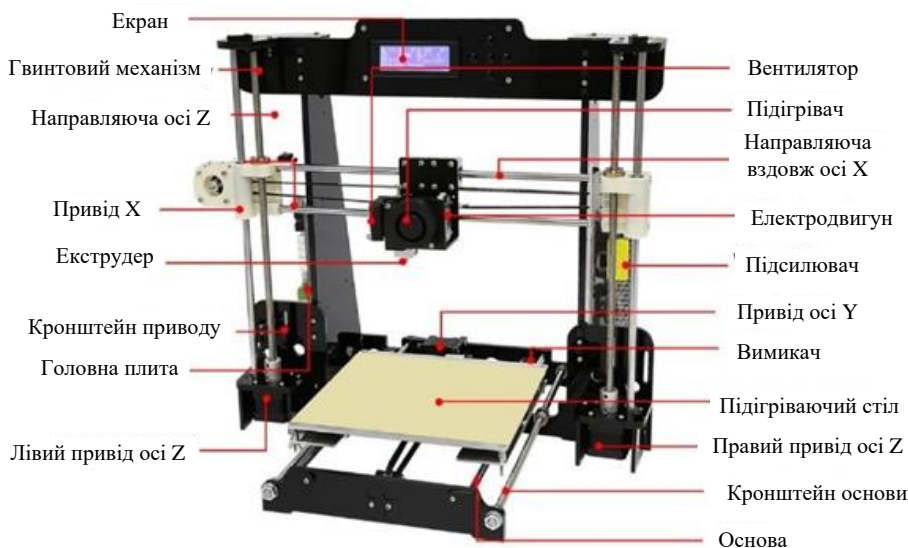


Рисунок 7 – Будова 3D-принтера Anet A8

швидкість виготовлення елемента, а також можливість застосування різних матеріалів та вибір їх кольорів.

Конструкція та попереднє дослідження

Для проведення модифікації 3D-принтера був використаний принтер типу Anet A8 (рис. 7), оскільки була поставлена задача модернізації наявного принтера, який працює за технологією FDM. Основні робочі параметри використовуюваного принтера наведені у таблиці 1 [11].

Таблиця 1 – Технічна характеристика 3D-принтера Anet A8

Параметри	Значення
Напруга живлення	від 110 до 220 В (АС)
Товщина шару	від 0,1 до 0,4 мм
Діаметр сопла	стандартне: 0,4 мм
Застосовувані філаменти	PLA, ABS, HIPS
Діаметр філаменту	1,75 мм
Формат файлів	STL, obj, jpg
Максимальні розміри друку	220 x 220 x 240 мм
Температура сопла	макс. 250 °С
Температура робочого столу	макс. 100 °С
Габаритні розміри принтера	500 x 450 x 400 мм
Маса	8,5 кг

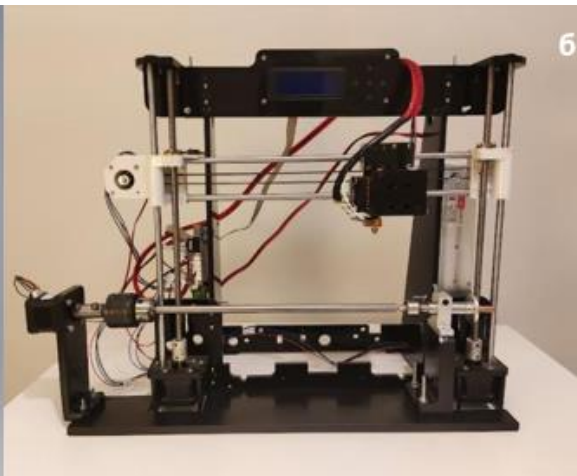
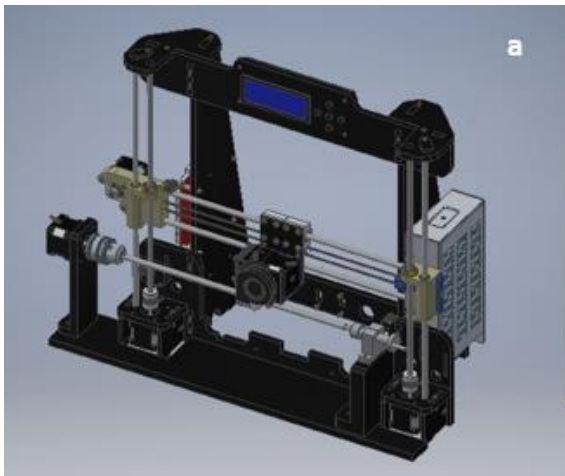
Перед подальшою модернізацією обраний 3D-принтер був розібраний на складові частини. В ході виконання робіт було виявлено, що конструкція принтера має досить низьку жорсткість та стійкість. Для вирішення цієї проблеми були використані спеціальні кутники, за допомогою яких підсилено конструкцію принтера. Також було видалено з конструкції робочий стіл, механізм переміщення, кроковий двигун і кінцеві клеми.

Найважливішим механізмом підготовленого проекту і елементом інноваційної конструкції є вісь, на поверхні якої друкується виріб. Це рішення є інноваційним, оскільки сьогодні на ринку принтерів такі схеми не використовуються. У підготовленій конструкції екструдер укладає нитку безпосередньо на вісь, яка обертається відносно осі X'.

Проектований пристрій повинен передбачати тримач для осі обертання, що дозволить легко і швидко її демонтувати. Для цього був обраний свердлильний патрон фірми VERTO [12], простий і надійний для використання у цьому випадку. Свердлильний патрон забезпечить достатнє зусилля затискання для надійного утримання осі обертання під час роботи. В свердлильному патроні можна закріпити деталь 2-13 мм, а сам він кріпиться за допомогою різьби 3/8x24 UNF. Для розміщення тримача разом з віссю були виконані спеціальні опори з кронштейнами.

Також ці опори призначені для стабілізації принтера. Весь виконаний проєкт представлений на рисунку 8.

Характеристики та аналіз друку виробів



а – розроблена в програмі Autodesk Inventor 2019 тримірний модель 3D-принтера;
б – реалізований проєкт 3D-принтера

Рисунок 8 – Проєкт 3D-принтера

У представленому рішенні багато факторів впливають на якість друку виробів. Це швидкість руху елементів кожної з осей, швидкість обертання осі як конструктивного елементу, швидкість подачі нитки та діаметр сопла принтера. У процесі систематизації необхідних робочих параметрів 3D-принтера було виготовлено багато тестових зразків, які подані на рисунку 9. Неправильний вибір швидкості друку призводить до нерівномірного розташування окремих шарів. При занадто швидкій подачі нитки шари накладаються один на один у напрямку осі Z. В ході експерименту було встановлено, що швидкість подачі екструдера повинна бути в 1,5 рази вищою за інші швидкості.



Рисунок 9 – Тестові зразки надрукованих валиків

Застосоване сопло чинить значний вплив на точність друку. Його вибір залежить від

матеріалу і необхідної точності друку. Сопла для 3D-принтерів доступні в діаметрах від 0,1 мм до 2,0 мм. Для реалізації друку вибрано стандартне сопло діаметром 0,4 мм, яке забезпечує хороший баланс між точністю, роздільною здатністю і швидкістю друку.

На якість друку також значно впливає тип використовуваної нитки. Вона повинна зберігатися в сухому стані і очищатися від пилу та інших забруднень.

Для експериментального друку використано нитку PLA діаметром 1,75 мм. Нею надруковано виріб діаметром 39,8 мм і висотою 50,2 мм (рис. 10). Отримана зовнішня поверхня виробу є доволі гладкою.



Рисунок 10 – Надрукований валик (вигляд збоку)

Застосований матеріал дозволив отримати доволі міцний виріб (рис. 11). Тут же помітні окремі шари з менш систематичною структурою. Розриви виникають на початку та по закінченню процесу друку.

Крім того, точка початку і закінчення друку в кожному шарі відрізняється, і вісь обертання працює з моменту подачі нитки разом з переміщенням екструдера відносно осі X. Це призводить до неточності створення деталі, оскільки кожна наступна точка друку зміщена відносно точки початку процесу друку.



Рисунок 11 – Надрукований валик (вигляд зверху)

Ще одна причина розривів між шарами в основі може бути спричинена слабкою адгезією між шарами або проблемою екструзії (неточне або надмірне видавлювання нитки з сопла).

Висновки та напрямок подальших досліджень

Описаний в статті процес друку та модернізований принтер є інноваційним, оскільки в літературних джерелах ніде не зустрічається. Також 3D-принтер з віссю, яка обертається, сьогодні неможливо придбати. Це дає широкі можливості для його розвитку.

Виходячи з результатів проведеного дослідження, можна зробити наступні висновки:

1. Під час виконання роботи необхідно було спроектувати механізм обертання осі принтера та вибрати кроковий двигун. Правильна робота принтера також визначалася відповідним підготовленим алгоритмом, ключовими параметрами якого були швидкість руху екструдера і обертової осі, швидкість подачі нитки та температура сопла. Було встановлено, що невірно вибрані значення цих параметрів чинили істотний вплив на якість друку виробу.

2. Основною перевагою описаної конструкції є те, що обертові елементи, створювані в процесі друку, відрізняються високою якістю виготовлення. Прийнята концепція дозволяє друкувати різні компоненти машин, які мають дуже високі вимоги до якості. Крім того, слід зауважити, що нанесення шарів на обертові елементи з використанням описаного принтера повинно значно підвищити міцність, враховуючи, що шари нитки краще контактують один із одним. Доказом є надрукований тестовий виріб, бічна поверхня якого щільна і компактна.

3. При роботі над принтером були помічені його недоліки. Так, оскільки друковані обертові елементи прикріплені до осі обертання, існує можливість друку елементів тільки у незначному діапазоні діаметрів. А відсутність безперервної подачі матеріалу може бути причиною виникнення значних напружень при роботі виробу, що може призвести до його пошкодження і навіть руйнування. Це явні недоліки запропонованого рішення, які відкривають новий простір для модернізації способу та принтера.

4. Принтер, який є предметом роботи, вимагає створення конструкції каркаса з дуже високою жорсткістю, оскільки у результаті обертального руху генеруються вібрації і відносно великий момент інерції. Для цього необхідно закріпити раму кронштейнами і кутниками. Хорошим варіантом може виявитися також додаткове демпфування елементів, що викликають вібрацію, тобто двигунів.

Напрямки подальших досліджень

Підхід, представлений в роботі, є інноваційним при застосуванні технології друку FDM, тому він охоплює безліч просторів, які необхідно доопрацювати, та таких, що потрібно розробити.

Основним компонентом, необхідним для правильної роботи принтера, є створення універсального програмного забезпечення для друку. За допомогою відкритої ліцензії відповідного програмного забезпечення доцільно внести зміни для якісного друку елементів. Розроблене програмне забезпечення має бути універсальним для всіх принтерів, що містять обертову вісь.

Наступна проблема полягає у розширенні діапазону діаметрів для друку виробів. Це також стосується осі, яка обертається, оскільки вона визначає початковий розмір виробу. З точки зору конструкції, збільшення розмірів

рами обертової осі і використання більш потужного двигуна має бути пропорційним до можливостей остаточного друку.

Широкою темою для обговорення є питання охолодження друкованого виробу. В результаті друку виробу виникають напруження, мінімізувати які можливо завдяки використанню нагрітої обертової осі. До того ж, це істотно покращить адгезію, що вплине на економність використання матеріалів.

Особлива увага повинна приділятися також середовищу для створення G-коду. Для цього буде корисно створити середовище типу «slicer», яке легко і швидко визначить параметри друку і створить необхідний G-код. Крім того, це усуне дефекти, викликані неправильним вибором параметрів друку для використовуваного принтера.

Отримані при підготовці зразки характеризуються хорошою якістю бічної поверхні, однак, основа елементів містить розриви. Для їх усунення необхідно доопрацювати параметри друку і модифікувати G-код. Саме це і є областю подальших розробок та модернізації конструкції принтера.

Література

1. Chojnacki B., Pawlik J., Kamisiński T. Influence of different materials used for 3D printing in miniature speaker enclosure development. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*. 2021. InterNoise21, Washington, D.C., USA, p. 4919-5918, 5631-5636 (6). URL: <https://doi.org/10.3397/IN-2021-3188>.

2. Pawlik J., Dzienniak D. Method of smoothing the surface of additively manufactured polylactide by thermal treatment in sodium chloride. *MATEC Web of Conferences*. 2021. 338. 01022. 10.1051/mateconf/202133801022.

3. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (I частина). *Наука, технології, інновації*. 2017. № 1. С. 68-77.

4. Borysiewicz A., Gonera P., Łęgowik D., Dembiczak T., Gospodarek K. Wykorzystanie metody przyrostowej w prototypowaniu, Wydawnictwo im. Stanisława Podobińskiego Akademii im. Jana Długosza w Częstochowie. 2018.

5. <https://www.2d-3d.ru/opisanie-programm/1536-osnovnye-metody-3d-pechati.html> (станом на 15.12.2021).

6. Finnes THigh Definition 3D Printing – Comparing SLA and FDM Printing Technologies,

South Dakota State University. *The Journal of Undergraduate Research*. 2015. No 13. P. 10-26.

7. Caban J. Szala M., Kęsik J., Czuba Ł. Wykorzystanie druku 3D w zastosowaniach automotive. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* R. 18. 2017. No 6. P. 573–579.

8. Ryabikina M. 3D metal printing: a brief SWOT analysis. *Reporter of the Priazovskiy State Technical University*. Section: Technical sciences. 2019. 45-52. 10.31498/2225-6733.38.2019.181282.

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

10. Walasek M. Druk 3D kul: Jak to zrobić. URL: <http://3d.edu.pl/druk-3d-kul-jak-to-zrobic/> (станом на 20.12.2021).

11. A8 3D Printer Installation Guide. URL: <http://anet3d.pl/wp-content/uploads/2018/02/A8-3D-Printer-Installation-Instructions1.1.pdf> (станом на 20.12.2021).

12. <https://katalog.grupatopex.com/en/akcesoria-do-elektronarzedzi/drill-chucks> (станом на 20.12.2021)

References

1. Chojnacki B., Pawlik J., Kamisiński T. Influence of different materials used for 3D printing in miniature speaker enclosure development. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*. 2021. InterNoise21, Washington, D.C., USA, p. 4919-5918, 5631-5636 (6). URL: <https://doi.org/10.3397/IN-2021-3188>.

2. Pawlik J., Dzienniak D. Method of smoothing the surface of additively manufactured polylactide by thermal treatment in sodium chloride. *MATEC Web of Conferences*. 2021. 338. 01022. 10.1051/mateconf/202133801022.

3. Androshchuk H. O. Adytyvni tekhnolohii: perspektyvy i problemy 3D-друку (I chastyna). *Nauka, tekhnolohii, innovatsii*. 2017. No 1. P. 68-77. [in Ukrainian]

4. Borysiewicz A., Gonera P., Łęgowik D., Dembiczak T., Gospodarek K. Wykorzystanie metody przyrostowej w prototypowaniu, Wydawnictwo im. Stanisława Podobińskiego

- Akademii im. Jana Długosza w Częstochowie. 2018. [in Polish]
5. <https://www.2d-3d.ru/opisanie-programm/1536-osnovnye-metody-3d-pechati.html> [in Russian]
6. Finnes THigh Definition 3D Printing – Comparing SLA and FDM Printing Technologies, South Dakota State University. *The Journal of Undergraduate Research*. 2015. No 13. P. 10-26.
7. Caban J. Szala M., Kęsik J., Czuba Ł. Wykorzystanie druku 3D w zastosowaniach automotive. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* R. 18. 2017. No 6. P. 573–579.
8. Ryabikina M. 3D metal printing: a brief SWOT analysis. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University*. Section: Technical sciences. 2019. 45-52. 10.31498/2225-6733.38.2019.181282.
9. Oleksyshen V. Analiz konstruktyvnykh osoblyvostei ta efektyvnosti zastosuvannia suchasnykh FDM prynteriv dlia prostorovoho druku polimernymy termoplastychnymy materialamy. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Serii: *Novi rishennia u suchasnykh tekhnolohiiakh*. 2020. No 1(3). P. 25–34. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2020.03.04> [in Ukrainian]
10. Walasek M. Druk 3D kul: Jak to zrobić., URL: <http://3d.edu.pl/druk-3d-kul-jak-to-zrobic/> [in Polish]
11. A8 3D Printer Installation Guide. URL: <http://anet3d.pl/wp-content/uploads/2018/02/A8-3D-Printer-Installation-Instructions1.1.pdf>
12. <https://katalog.grupatopex.com/en/akcesoria-do-elektronarzedzi/drill-chucks>