

УДК 66.08:678.5

DOI: 10.15587/2312-8372.2020.200999

ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ТА КІНЕМАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ 3D ДРУКУ МЕТОДОМ FDM

Олексишен В. О., Сокольський О. Л., Колосов О. Є., Соловей В. В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА 3D ПЕЧАТИ МЕТОДОМ FDM

Олексишен В. А., Сокольский А. Л., Колосов А. Е., Соловей В. В.

DETERMINATION OF GEOMETRIC AND KINEMATIC CHARACTERISTICS OF FDM 3D PRINT PROCESS

Oleksyshen V., Sokolskyi A., Kolosov A., Solovei V.

Досліджено процес нанесення полімерного термопластичного матеріалу в процесі 3D друку з використанням технології FDM (Fused Deposition Modeling – формування методом наплавки). Об'єктом дослідження став дискретний шар дослідного зразка. Для визначення геометричних параметрів було виготовлено зразки товщиною в один діаметр сопла (0,5 мм) друкувальної головки 3D принтера. Отримані зразки розрізані на ділянки однакової ширини (10 мм), на кожній ділянці було відсічено окремі шар нанесеного матеріалу. Це дало змогу визначити зміну товщини від початкової до кінцевої точки шару. Виявилось, що товщина шару менша за діаметр сопла на початку руху друкувальної головки, поступово зростає та на певному етапі починає перевищувати діаметр сопла. Отримані значення становили від 0,4 до 0,6 мм для сопла діаметром 0,5 мм. Причина полягає в тому, що на початку подачі витратного матеріалу має місце високоеластичне запізнення реакції полімерного матеріалу на тиск у друкувальній головці та певний проміжок часу ця частина матеріалу не наноситься на зразок, а потім має місце ефект розбухання розплаву полімеру. Причому зі зростанням діаметра сопла вплив цих явищ також зростає. Також процес друку фіксувався на широкоформатну відеокамеру у HD-якості з частотою 50 кадрів/с, що дало змогу дослідити динаміку нанесення витратного полімерного термопластичного матеріалу. Отримані результати показали відмінність швидкостей від заданих у виконавчому коді. При чому для різних конструкцій кінематичних схем переміщення друкувальної головки відхилення параметрів було різним – реальні значення були більшими від теоретичних (заданих) на 20–50 % в залежності від типу FDM 3D принтера. Це пояснюється відмінністю інерційних характеристик різних конструкцій кінематичних схем переміщення друкувальної головки. Отримані результати є основою для подальшого більш

детального вивчення впливу конфігурації формуючих органів та конструкції FDM 3D принтерів на процес просторового друку.

Ключові слова: 3D друк, 3D принтер, Fused Deposition Modeling, полімерний термопластичний матеріал, друкувальна головка, кінематична схема.

Исследован процесс нанесения полимерного термопластичного материала в процессе 3D печати с использованием технологии FDM (Fused Deposition Modeling – формирование методом наплавки). Объектом исследования стал дискретный слой опытного образца. Для определения геометрических параметров были изготовлены образцы толщиной в один диаметр сопла (0,5 мм) печатающей головки 3D принтера. Полученные образцы разрезаны на участки одинаковой ширины (10 мм), на каждом участке был отсечен отдельный слой нанесенного материала. Это позволило определить изменение толщины от начальной до конечной точки слоя. Оказалось, что толщина слоя меньше диаметра сопла в начале движения печатающей головки, постепенно растет и на определенном этапе начинает превышать диаметр сопла. Полученные значения составляли от 0,4 до 0,6 мм для сопла диаметром 0,5 мм. Причина заключается в том, что в начале подачи расходного материала имеет место высокоэластичное опоздание реакции полимерного материала на давление в печатающей головке и определенный промежуток времени эта часть материала не наносится на образец, а затем имеет место эффект разбухания расплава полимера. Причем с ростом диаметра сопла влияние этих явлений также возрастает. Также процесс печати фиксировался на широкоформатную камеру в HD-качестве с частотой 50 кадров/с, что позволило исследовать динамику нанесения расходного полимерного термопластичного материала. Полученные результаты показали отличие скоростей от заданных в исполнительном коде. Причем для различных конструкций кинематических схем перемещения печатающей головки отклонение параметров было разным – реальные значения были больше теоретических (заданных) на 20–50 % в зависимости от типа FDM 3D принтера. Это объясняется различием инерционных характеристик различных конструкций кинематических схем перемещения печатающей головки. Полученные результаты являются основой для дальнейшего более детального изучения влияния конфигурации формирующих органов и конструкции FDM 3D принтеров на процесс пространственной печати.

Ключевые слова: 3D печать, 3D принтер, Fused Deposition Modeling, полимерный термопластичный материал, печатающая головка, кинематическая схема.

1. Вступ

Технологія адитивного виробництва за останні роки набула широкого поширення майже у всіх сферах людського життя та галузях виробництва. Кожен другий виробник в світі нарощує інвестиції в адитивне виробництво. Вже понад 80 % прототипів та 60 % функціональних вузлів виготовляються за

допомогою 3D друку [1]. Аналітики всього світу вбачають вибуховий ріст в технології адитивного виробництва. Виробники обладнання зазвичай основні ресурси вкладають в розробку нових моделей та типів устаткування. Проте залишається погано вивченим сам процес формування виробів. Часто спостерігається нестабільність процесу 3D друку, що важко передбачити на етапі моделювання виробу. Оператори даного устаткування часто мають справу з різними дефектами, що утворюються під час 3D друку. Причини та природа, а головне прогнозування появи таких дефектів є невідомими.

Основним принципом адитивного виробництва є пошарове нанесення конструкційного матеріалу згідно цифрової моделі виробу. Найбільш поширеною адитивною технологією є FDM (Fused Deposition Modeling – формування методом наплавки) [2]. Пристрої даної технології використовують полімерний витратний матеріал у вигляді прутка сталого діаметру – філамент. Під час формування виробу, розплавлений матеріал наноситься на вже застиглий шар. Відомо, що полімерні матеріали мають змінні від температури й швидкості деформації характеристики. Саме ця особливість створює проблеми під час друку тим чи іншим витратним полімерним матеріалом. Основним місцем появи дефектів є межа між холодним та гарячим шаром. Тому інтерес представляє вивчення властивостей між шарами матеріалу. Для дослідження цього питання проводились випробування друкованих зразків на міцність.

Схожі дослідження були проведені вченими з університету Флориди та інженерного коледжу при університеті Каліфорнії в Берклі [3]. Дослідники провели випробування ряду зразків на силу розтягу та зсуву виготовлених з матеріалу ABS та PC. Одним з основних висновків є анізотропія механічних властивостей між розтягом вздовж та поперек шарів матеріалу (близько 30 %). Проте дослідження не дає змогу встановити силу міжшарової адгезії та геометричні характеристики в зоні контакту шарів.

Також були проведені схожі дослідження [4–6], в яких випробовувались різні матеріали при різних параметрах друку. Основними недоліками є те, що у всіх дослідженнях умови виготовлення зразків були дуже варіативними. Порівнюючи результати для однакових матеріалів, слід відмітити відмінність у значеннях. Це можливо пояснити анізотропією властивостей та неоднорідністю структури друкованих зразків.

Особливий інтерес становить дослідження [7]. В даному дослідженні наведені макrofотопоперечного перерізу структури зразків надрукованих соплами різних діаметрів та з різною товщиною шарів. На них видно, що внутрішній об'єм включає велику кількість порожнин, при чому їх форма та розмір є непостійними.

Структура друкованих виробів в цілому є слабо визначеною, тому фізичні характеристики зразків також є неоднозначними. Тому необхідно провести дослідження процесу нанесення матеріалу вздовж шару, визначити геометричні параметри окремого шару.

Отже, *об'єктом дослідження* є геометричні параметри дискретного шару дослідного зразка. *Мета роботи* полягає у встановленні закономірностей впливу типу кінематики та режимів роботи 3D принтерів на рівномірність та швидкість просторового друку.

2. Методика проведення досліджень

Виходячи з виконаних авторами попередніх досліджень було виявлено нерівномірність результатів для кожного з типів зразків. До того ж в кожній групі випробовувань на міцність була певна кількість експериментів, що випадають з загальної картини. Тому необхідно дослідити детально геометричні параметри та динаміку процесу нанесення матеріалу в межах окремого шару.

Визначення геометричних параметрів окремого шару виконувалось за такою методикою:

1. Виготовляється 10 прямокутних зразків (рис. 1) довжиною 100 мм, висотою 20 мм і товщиною рівною діаметру сопла 0,5 мм.

2. Параметри друку наступні: швидкість друку $V_{друку}=30$ мм/с; температура друку $t_{\partial}=220^{\circ}\text{C}$; товщина шару $h_{ш}=0,2$ мм. Отримані зразки було розрізано через кожні 10 мм. Для отриманих відрізків було виміряно товщину та масу.

Як перероблюваний матеріал використовувався полілактид (PLA).

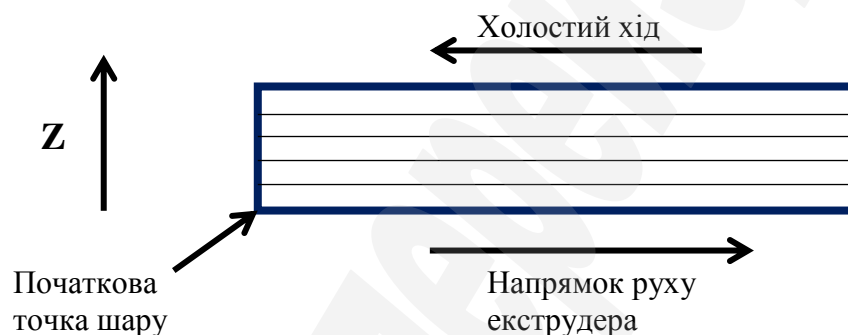


Рис. 1. Схема друку зразків

Визначення динаміки побудови шару виконувалось за такою методикою:

1. Змодельовані зразки довжиною 100 мм та висотою 20 мм зі шкалою у вигляді стінок через кожні 10 мм (рис. 2). Товщина зразків рівна діаметру сопла.

2. Параметри друку відповідали найоптимальнішим режимам відповідно до попередніх досліджень: $t_{друку}=220^{\circ}\text{C}$; $V_{др}=30$ мм/с. Перехід на наступний шар відбувався в одній точці, тому матеріал наноситься при переміщенні екструдера зліва на право, в зворотному напрямку хід холостий.

3. Зразок розміщувався вздовж осі X 3D принтера. Навпроти на рівні робочої платформи встановлюється відеокамера, що фокусується на зразку.

4. Після завершення побудови шкали, камера вмикається та знімається процес друку декількох шарів. Для одного зразка зйомка повторюється 2–3 рази.

5. Дані операції необхідно зробити для принтерів з механікою типу Prusa i3 та H-Bot.

6. Для знятих відео обираються кадри, що відповідають процесу побудови одного шару від початку нанесення матеріалу до повернення екструдера в нульове положення зворотнім холостим ходом.

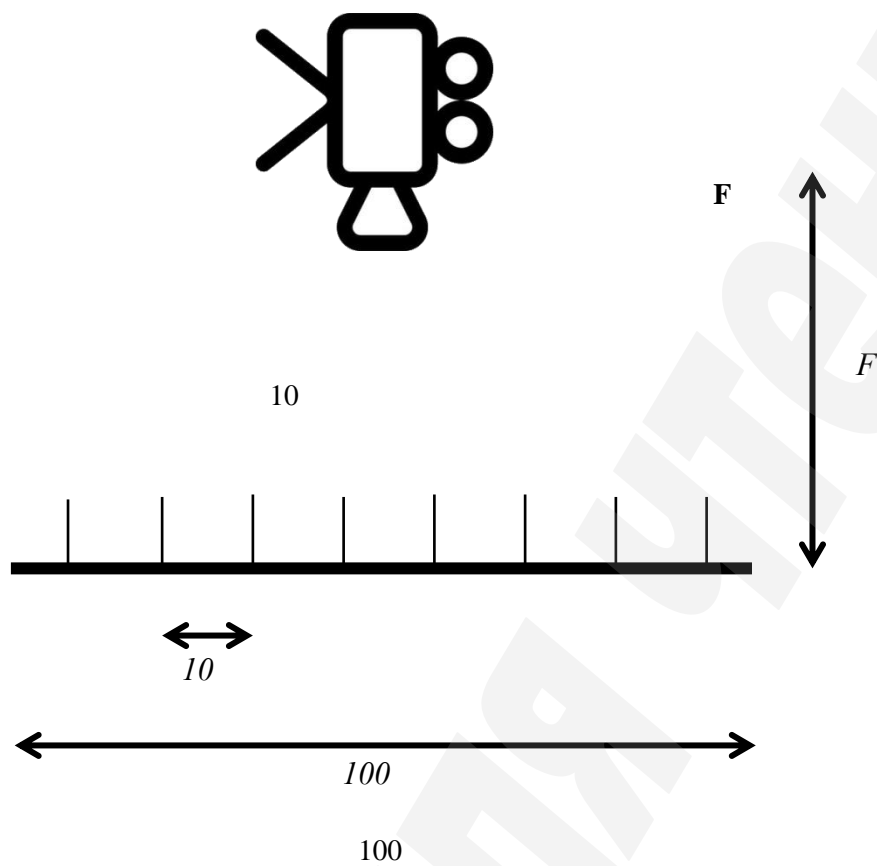


Рис. 1. Процес зйомки процесу 3D друку

7. Кожен уривок переглядається покадрово та рахується кількість кадрів для кожної ділянки в 10 мм. Рахується кількість кадрів на зупинку в нульовій точці шару.

3. Результати досліджень та обговорення

Результати вимірювань геометричних параметрів шару такі (рис. 3, 4).

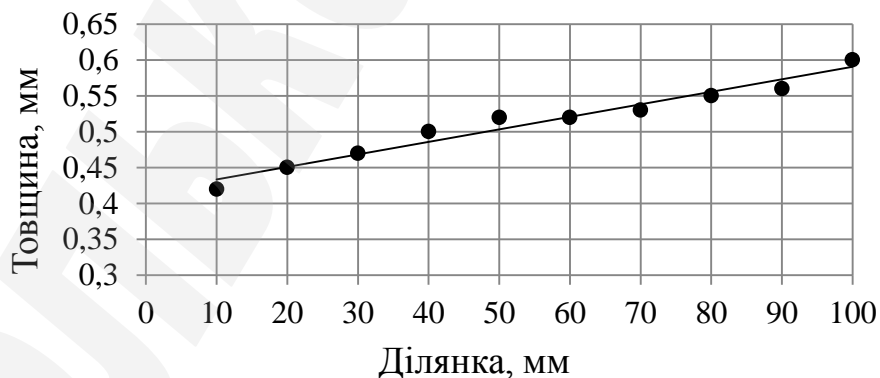


Рис. 3. Зміна товщини екструдованого шару полілактиду PLA від початкової точки друку

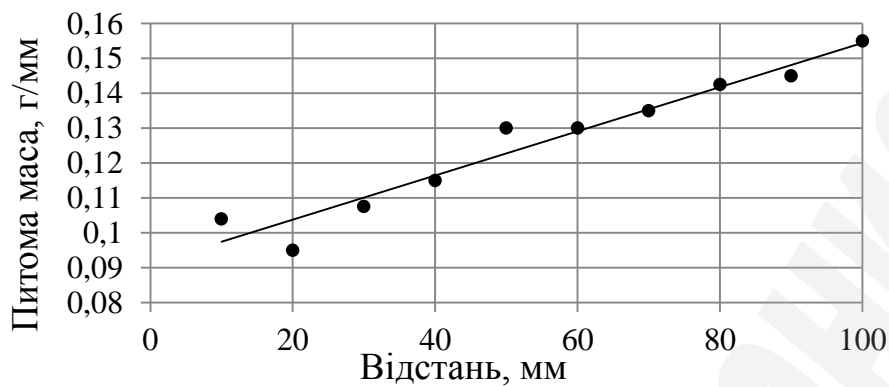


Рис. 4. Зміна товщини екструдованого шару полілактиду PLA від початкової точки друку

Виходячи з результатів було виявлено, що товщина шару є нерівномірною. На початку шару товщина менше, ніж діаметр сопла, поступово зростає та до кінця шару стає більшою за діаметр сопла. Також на проміжку від початку шару до середини була присутня деламінація (розшарування). Тобто на початку руху присутня недоекструзія, а наприкінці «розбухання» шару (рис. 4, 5).

Встановлено розподіл швидкостей переміщення друкувальної головки в межах формування одного шару для двох типів 3D принтерів: Prusa i3 [8] та H-Bot [9]. Результати показані на рис. 5, 6.

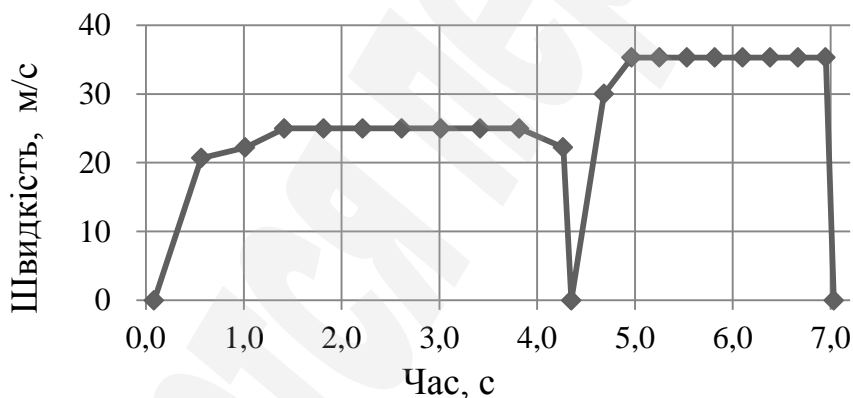


Рис. 5. Графік швидкості руху екструдера 3D-принтера з механікою Prusa i3

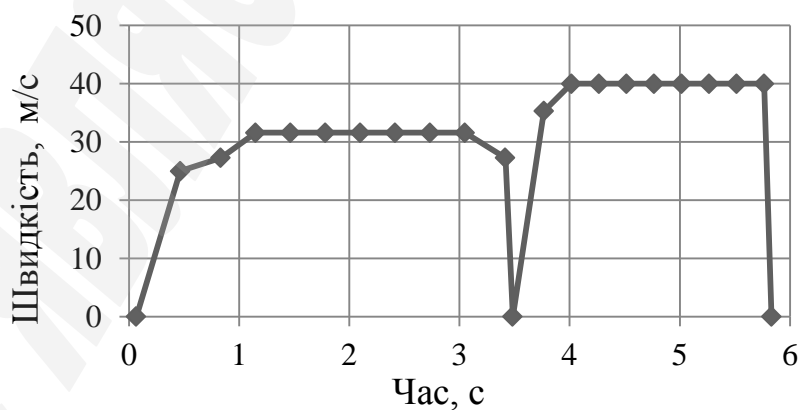


Рис. 6. Графік швидкості руху екструдера 3D-принтера з механікою H-Bot

Отримані результати показуються динаміку руху екструдера вздовж шару. Данні зі швидкостей показали відмінність від значень налаштувань в слайсері Cura [10]. Для обох типів механік виявилось, що фактична середня швидкість руху менша від заданої. Причому для кожного типу механіки ця відмінність різна.

Для визначення відмінності визначимо різницю в часі друку зразків від теоретичної при різних швидкостях друку для різних конструкцій 3D принтерів (рис. 7).

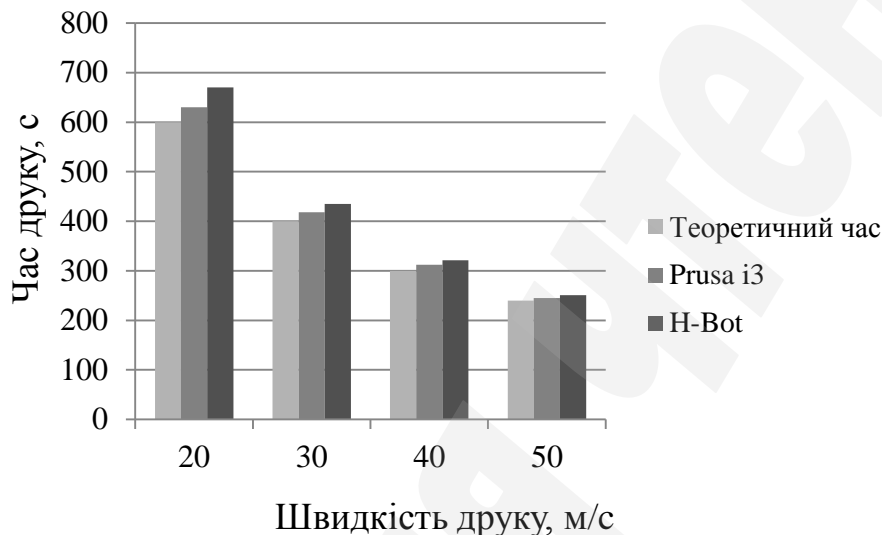


Рис. 7. Час друку зразків на різних принтерах при різних швидкостях

Як видно з рис. 7, зі зростанням швидкості друку, відмінність від теоретичного часу друку від фактичного поступово падає. При чому час друку для механіки H-Bot завжди більший за час друку на Prusa i3.

4. Висновки

Результати експериментальних досліджень 3D друку показали, що кожний шар полімеру наноситься нерівномірно, збільшуючись по довжині. Фактичний час друку завжди більший за теоретичний, різниця у часі поступово зростає зі зменшенням швидкості друку. Принтери з кінематикою H-Bot показали більше відхилення швидкості друку від теоретичного, ніж принтери з кінематикою Prusa. Отримані результати є основою для подальшого більш детального вивчення впливу конфігурації формуючих органів та конструкції FDM 3D принтерів на процес просторового друку.

References

1. Wohlers *Report* 2013. Available at: <https://wohlersassociates.com/press59.html>
2. Surange, V. G., Gharat, P. V. (2016). 3D Printing Process Using Fused Deposition Modelling (FDM). *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3 (3). Available at: https://www.researchgate.net/publication/301557905_3D_Printing_Process_Using_Fused_Deposition_Modelling_FDM

3. Cantrell, J. T., Rohde, S., Damiani, D., Gurnani, R., DiSandro, L., Anton, J. et. al. (2017). Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts. *Rapid Prototyping Journal*, 23 (4), 811–824. doi: <http://doi.org/10.1108/rpj-03-2016-0042>
4. Divyathej, M., Varun, M., Rajeev, P. (2016). Analysis of mechanical behavior of 3D printed ABS parts by experiments. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7 (3). Available at: <https://www.ijser.org/researchpaper/Analysis-of-mechanical-behavior-of-3D-printed-ABS-parts-by-experiments.pdf>
5. Letcher, T., Waytashek, M. (2014). Material Property Testing of 3D-Printed Specimen in PLA on an Entry-Level 3D Printer. *Volume 2A: Advanced Manufacturing*. doi: <http://doi.org/10.1115/imece2014-39379>
6. Johnson, G. A., French, J. J. (2018). Evaluation of Infill Effect on Mechanical Properties of Consumer 3D Printing Materials. *Advances in Technology Innovation*, 3 (4), 179–184.
7. Kuznetsov, V., Solonin, A., Urzhumtsev, O., Schilling, R., Tavitov, A. (2018). Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process. *Polymers*, 10 (3), 313. doi: <http://doi.org/10.3390/polym10030313>
8. Prusa resurch. Available at: <https://www.prusa3d.com/>
9. Weikert, S., Ratnaweera, R., Zirn, O. (2010). Modeling and measurement of H-Bot kinematic systems. *Swiss Federal Institute of Technology*. Zurich. Available at: https://www.icvr.ethz.ch/ConfiguratorJM/publications/MODELING_A_132687166151936/3314_mod.pdf
10. *Ultimaker Cura*. Available at: <https://ultimaker.com/en/resources/52833-install-ultimaker-cura>

The process of applying a polymer thermoplastic material in the 3D printing process using the FDM technology (Fused Deposition Modeling) was investigated. The object of study was the discrete layer of the prototype. To determine the geometric parameters, samples were made with a thickness of one nozzle diameter (0.5 mm) of the print head of a 3D printer. The obtained samples were cut into sections of the same width (10 mm), in each section a separate layer of the deposited material was cut off. This made it possible to determine the change in thickness from the initial to the final point of the layer. It turned out that the layer thickness is less than the diameter of the nozzle at the beginning of the movement of the print head, gradually grows and at a certain stage begins to exceed the diameter of the nozzle. The obtained values were from 0.4 to 0.6 mm for a nozzle with a diameter of 0.5 mm. The reason is that at the beginning of the supply of the consumable material there is a highly elastic delay in the reaction of the polymeric material to the pressure in the print head and for a certain period of time this part of the material is not applied to the sample, and then the polymer melt swells. Moreover, with an increase in the nozzle diameter, the effect of these phenomena also increases. Also, the printing

process was recorded on a wide-format camera in HD-quality with a frequency of 50 frames/s, which allowed to study the dynamics of the application of consumable polymer thermoplastic material. The results showed a difference in speeds from those specified in the executive code. Moreover, for different designs of kinematic schemes for moving the print head, the deviations of the parameters were different – real values were more than theoretical (set) by 20–50 %, depending on the type of FDM 3D printer. This is due to the difference in the inertial characteristics of the various structures of the kinematic patterns of movement of the print head. The results are the basis for further more detailed study of the influence of the configuration of the forming organs and the design of FDM 3D printers on the spatial printing process.

Keywords: *3D printing, 3D printer, Fused Deposition Modeling, polymer thermoplastic material, print head, kinematic scheme.*