

УДК 62-9

- Комісаров О.О. аспірант Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: Al.komissarov@meta.ua, *ORCID* 0009-0003-6285-3674
- Пухальська Г.В. канд. техн. наук, доцент кафедри технологія машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: puhalska66@gmail.com, *ORCID* 0000-0001-8118-4179
- Дядя С.І. канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри технологія машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: djadja@zp.edu.ua; *ORCID* 0000-0002-7457-7772

ПОСТ-ОБРОБКА ДЕТАЛЕЙ ФРЕЗЕРУВАННЯМ НА ВЕРСТАТІ З ЧПК ПІСЛЯ 3D ДРУКУ МЕТОДОМ НАПЛАВЛЕННЯ

Мета роботи. Провести дослідження можливості фрезерування зразків з різних полімерних матеріалів після їх виготовлення 3D-друком. Моделювання методом Наплавлення - Fused Deposition Modeling (FDM), визначити оптимальні режими фрезерування, які поліпшують якість поверхні та точність розмірів.

Методи дослідження. Експериментальним шляхом визначено шорсткість та точність зразків з полімерних матеріалів, які були виготовлені FDM методом на 3D-принтері RepSystem V2.1 з програмою для створення G-коду PrusaSlicer та оброблені з різними режимами на фрезерному верстаті з ЧПК Profi+Wood. Точність розмірів визначалась за допомогою механічного мікрометра МК 25 ГОСТ 6507-90 з точністю 0,01 мм. Для дослідження поверхні оброблених зразків використовувався цифровий мікроскоп MikroView 500x.

Отримані результати. Визначені точність розмірів та шорсткість поверхні друкованих зразків з полімерних матеріалів після обробки фрезами різних конструкцій з різними режимами різання.

Наукова новизна. Досліджено можливості використання механічної обробки методом фрезерування зразків з різних полімерних матеріалів, які використовуються для 3D-друку.

Практична цінність. Проведений аналіз фрез для обробки і проведено тестування можливості їх використання для деталей, надрукованих FDM методом. Рекомендовані режими фрезерування для матеріалів, які використовуються для 3D-друку, які значно поліпшують якість поверхні: для однозубої фрези числа обертів - 22000 об/хв та подача - 1800 мм/хв.; для тризубої фрези: числа обертів - 22000 об/хв та подача 2700 мм/хв. При обробці на цих режимах шорсткість знижується на 95%. Встановлено, що при пост-обробці пластиків після 3D-друку фрезеруванням можливо досягти точності розмірів до 10 квалітету. Визначені, полімерні матеріали, вироби з яких після FDM друку рекомендовано остаточно обробляти фрезеруванням для виготовлення точних макетів, майстер-моделей для лиття, форм для формування деталей вакуумом і як закінчену пластикову деталь при одиничному та дрібносерійному виробництві.

Ключові слова: Моделювання методом Наплавлення, 3D-принтер, пост-обробка, фрезерування, пластик, шорсткість, точність.

Вступ

Аддитивні технології - одна з форм технологій виробництва, де тривимірний об'єкт створюється шляхом послідовного накладання одного шару матеріалу на інший (друку, спікання). Для друку використовується 3D-принтер, який забезпечує створення фізичного об'єкта на основі цифрової 3D-моделі шляхом послідовного накладання пластичного матеріалу. 3D-друк знайшов широке застосування в медицині, освіті, машинобудівній, авіаційній, харчовій промисловості та інших сферах діяльності людини. Основними напрямками вдосконалення методів і технологій тривимірного друку є підвищення точності і швидкості виготовлення деталей, розширення номенклатури застосовуваних і

використовуваних одночасно матеріалів, усунення дефектів друкованої продукції [1].

Технологія FDM (Fused Deposition Modelling) - моделювання методом пошарового наплавлення була запатентована в 1989 році Скоттом Краппом, одним із співзасновників компанії Stratasys [2]. FDM застосовується для створення тривимірних моделей, макетів, виробів до яких не пред'являються особливі вимоги до якості поверхні і точності виготовлення. В якості витратних матеріалів доступні всілякі термопластики, композити, полікарбонати, поліаміди, полістирол, лігнін та багато інших. Моделювання методом FDM застосовується для швидкого прототипування та слугує недорогою альтернативою стандартним методам при виготовленні у дрібносерійному виробництві [3-6].

На даний час технологія 3D-друку не завжди дозволяє отримати виріб, готовий до використання. За рахунок його пошарового створення при 3D-друці (зокрема FDM методом) досить часто стає проблема додаткової обробки для поліпшення форми та якості поверхні. В більшості випадків для пост-обробки використовується ручна механічна обробка, піскоструминна обробка, хімічна обробка, які є малопродуктивними та не дозволяють точно витримати розміри.

Фрезерування деталей після 3D-друку є додатковим процесом обробки для покращення якості поверхні або досягнення певних характеристик деталей. Якість поверхні після фрезерування залежить від декількох факторів, включаючи вихідну якість FDM друку, матеріал, що використовується при цьому, параметри фрезерування та стан фрезерного верстата.

Аналіз досліджень та публікацій

Основна перевага процесу адитивного виробництва полягає в тому, що він може отримувати вироби складної форми, має низьку вартість і не потребує будь-яких складних інструментів для виробництва готової продукції [7]. Одним з найбільш часто використовуваних методів є FDM. При цьому основними причинами обмеженого застосування методу є низька якість зовнішньої поверхні, неможливість виготовлення деталей великого розміру, використання обмежених матеріалів [8], об'ємна похибка та відхилення форми [9]. Дослідження, спрямовані на розширення цих обмежень, можна розділити на два напрямки. За першим напрямком роботи зосереджуються на вдосконаленні технології, за другим - на додатковій обробці надрукованих деталей, що відомий як пост-обробка [10].

Дослідження з використання фрезерних верстатів з ЧПК для покращення якості поверхні деталей, друканих FDM методом, свідчить про те, що дуже складно інтерпретувати оптимальні параметри різання цих деталей [11]. Крім цього деякі дослідження показують негативні результати через труднощі регулювання осі Z верстата з ЧПК [12].

У зв'язку з цим визначення геометрії інструментів, режимів фрезерування деталей, отриманих FDM методом, є актуальним. Це може надати безліч переваг у виробництві деталей за рахунок усунення слідів між шарами, що забезпечить якість форми та шорсткість поверхні.

Мета роботи

Провести дослідження можливості фрезерування зразків з різних полімерних матеріалів після їх виготовлення 3D-друком FDM методом, визначити оптимальні режими фрезерування, які поліпшують якість поверхні та точність розмірів.

Матеріал і методика досліджень

Для 3D-друку FDM методом використовувався 3D принтер RepSystem V2.1 з програмою для створення G-коду PrusaSlicer; шаблоном заповнення - Rectilinear; щільністю заповнення - 100%. Особливістю даного принтера є можливість змінювати на печатних головках діаметри сопел. Для виготовлення зразків використовувалися сопла діаметром 0,8 та 1,2 мм. Висота шару матеріалу, що наплавлявся, не повинна перевищувати однієї третини від діаметра сопла. При друкуванні зразків з PC його змінювали від 0,2 мм до 0,5 мм. Для формування при друку їх структури досліджувалась щільність заповнення, коефіцієнт екструзії та висота шару матеріалу при наплавленні.

Зразки для проведення експериментів виготовляли з шести найбільш поширених матеріалів для 3D-друку: ABS, PLA, PC, CoPET, PBT, PA(Nylon).

ABS-пластик, акрилонітрілбутадієнстірол - це найпопулярніший і один з кращих витратних матеріалів для 3D-друку. ABS не токсичний, ударостійкий і еластичний. Температура плавлення становить від 220°C до 240°C. ABS - пластик має рівномірну та однорідну якість поверхні надрукованих виробів. Вироби легко обробляються в етилацетаті, ацетоні, дихлоретані, дихлорметані. Чудово підходить для 3D-друку більшості ненавантажених виробів, до яких не пред'являються високі вимоги. Температура експлуатації від -10°C до +90°C. Пластик ABS+ є ABS пластиком, але з добавками, які знижують згортання при охолодженні. Температура експлуатації від -40°C до +80°C [13, 14].

CoPET - більш жорсткий у порівнянні з ABS-пластиком. Для нього характерні: висока розмірна стабільність, глянцева поверхня; інертність до розчинників; висока адгезія між шарами при друці; відсутність деламінації і деформації при друці. Рекомендується для 3D-друку деталей технічного призначення - втулки, муфти, підшипники, несильно навантажені шестерні тощо. Температура експлуатації від -40°C до +60°C [13, 15].

PLA - пластик є найкращим матеріалом для початку роботи з 3D-принтером. Практично повна відсутність його усадки сприяє правильному друку моделі, а також забезпечує високу роздільну здатність друку, що дозволяє створювати моделі геометрично складніші, ніж при використанні ABS. Матеріал призначений для 3D-друку різних виробів з підвищеною деталізацією, макетів, прототипів, іграшок. Температура експлуатації від -10°C до +60°C [3].

PC - прозорий матеріал для 3D-друку, з характерною високою жорсткістю і одночасно високими характеристиками міцності. Стійкий до високих температур. Використовується для 3D-друку деталей різного призначення: корпусів, кріплень. Температура експлуатації до 120°C.

PET - прозорий матеріал для 3D-друку, має високу механічну міцність і ударну стійкість. Стійкий

до стирання і багаторазових деформацій при розтягуванні і згині, можливе гартування. Температура експлуатації від -60°C до $+220^{\circ}\text{C}$ [13, 14].

Нейлон. Для друку нейлоном потрібна вища температура, що знаходиться в діапазоні від 260°C до 280°C та закрита камера, що підігривається. Нейлон має високу здатність вбирати воду, а також більш тривалий період застигання. Деталі з даного матеріалу виходять не такими жорсткими, як з ABS-пластика і його можна використовувати в шарнірах ковзання.

При фрезеруванні після 3D-друку використовувався фрезерний верстат з ЧПК Profi+ Wood, на якому частоту обертання шпинделя можна регулювати до 24000об/хв. Для обробки плоских зразків використовувалися твердосплавні однозубі та трьохзубі спіральні кінцеві фрези $\varnothing 3\text{мм}$ та двозуба з прямими канавками (рис. 1). Для фрезерування 3D-рельєфів використовувалася двозуба фреза зі сферичним торцем.



Рисунок 1. Кінцеві фрези [16]

Програма для обробки деталі створювалась за допомогою Mecsoft Visual CAM.

Дослідження фрезерування складних поверхонь зразків з різних матеріалів виконувалось на моделі, наведеної на рис. 2.

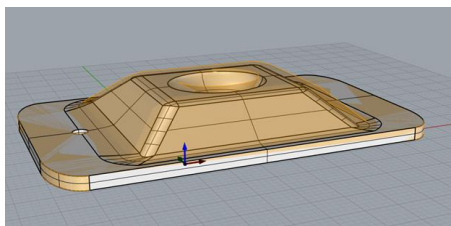


Рисунок 2. Модель зразка для дослідження фрезерування різних матеріалів на верстаті з ЧПК

Для дослідження точності пост-обробки фрезерування різними фрезами використовувалася модель, що наведена на рис.3.

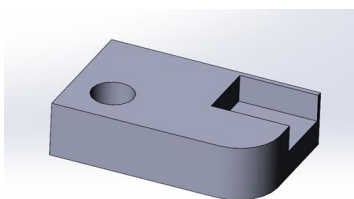


Рисунок 3. Тестова модель для перевірки точності розмірів при фрезеруванні

Шорсткість поверхні зразків (рис. 4) після друку FDM методом та фрезерування вимірювалася на профілометрі 171621 (рис. 5).

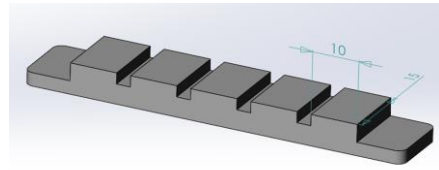


Рисунок 4. Модель зразка для дослідження впливу режимів фрезерування на шорсткість

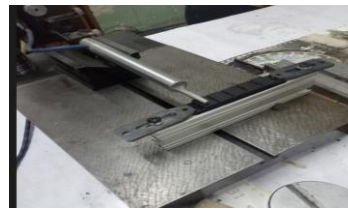


Рисунок 5. Вимірювання шорсткості на профілометрі

Точність розмірів визначалась з точністю $0,01\text{ мм}$ за допомогою механічного мікрометра МК 25 ГОСТ 6507-90. Для дослідження поверхні оброблених зразків використовувався цифровий мікроскоп MikroView 500x.

Результати досліджень та обговорення

Попереднім кроком при створенні зразків було визначення того, яка повинна бути товщина шару пластика при друку, щоб забезпечити достатню для з'єднання адгезію. Дані для досліджень наведені в табл. 1. В якості матеріалу використовувався PC пластик.

Таблиця 1 - Параметри друку з різною висотою шару, що наплавляється

№	Діаметр сопла, мм	Висота шару, мм	Щільність заповнення, %	Коефіцієнт екструзії
1	0,8	0,2	100	1,00
2	0,8	0,25	100	1,00
3	0,8	0,3	100	1,00
4	1,2	0,2	100	1,00
5	1,2	0,3	100	1,00
6	1,2	0,4	100	1,00
7	1,2	0,5	100	1,00

Для максимальної адгезії між шарами пластика при 3D друці використовувалась температура сопла 250°C і температура столу 120°C . Результати друку соплами діаметрами 1,2 мм та 0,8 мм з висотою шару від 0,2 до 0,5 мм показані на рис. 6 та 7.

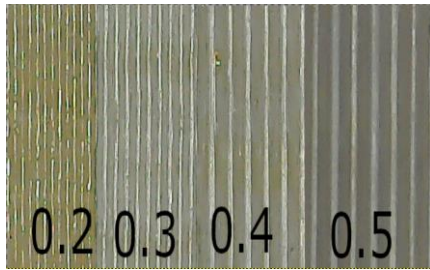


Рисунок 6. Результати друку соплом 1,2 мм

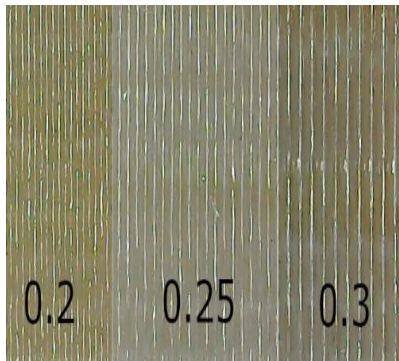


Рисунок 7. Результати друку соплом 0,8 мм

Дослідження обробки фрезою зразків показали, що зі збільшенням висоти шару адгезія погіршується. При фрезеруванні кінцевою тризубою фрезою з частотою обертання шпинделя 12000 об/хв, подачі 0,01 мм/зуб, осьовою глибиною різання 0,5 мм, радіальною глибиною 3 мм відбувалося відшарування матеріалу у вигляді сколів. Найбільший скол (рис. 8) спостерігався на зразках, які були створені при висоті шару 0,5 мм.



Рисунок 8. Скол, який виник при фрезеруванні зразка, створеного при висоті шару 0,5 мм

В протипагу цьому зразки, надруковані з шаром 0,2 мм, як при використанні сопла діаметром 1,2 мм так і при використанні сопла 0,8 мм, при фрезеруванні не сколювалися. Тому наступні дослідження з вибору щільності заповнення та коефіцієнту екструзії (табл. 2) проводилися при друкуванні зразків з висотою шару 0,2 мм.

Таблиця 2 - Параметри друку з різною щільністю заповнення та коефіцієнтом екструзії

№ зразка	Діаметр сопла, мм	Висота шару, мм	Щільність заповнення, %	Коефіцієнт екструзії
21	0,8	0,2	90	1,00
22	0,8	0,2	100	1,00
23	0,8	0,2	100	1,05
24	0,8	0,2	100	1,10
25	0,8	0,2	100	1,15
26	0,8	0,2	100	1,20
31	1,2	0,2	90	1,00
32	1,2	0,2	100	1,00
33	1,2	0,2	100	1,05
34	1,2	0,2	100	1,10
35	1,2	0,2	100	1,15

В процесі друку було виявлено, що при коефіцієнті екструзії 1,20 (зразок 26) на поверхню наноситься така кількість пластика (рис. 9), яка призводить до руйнування нагрівальної головки принтера. Тому друк виконувався з максимальним коефіцієнтом екструзії 1,15.



Рисунок 9. Нашарування пластика при перебільшеній екструзії

Для дослідження наявності пор в структурі зразків було виконано фрезерування верхніх шарів. Поверхні, що утворилися показані на рис. 10-19.

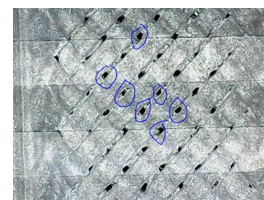


Рисунок 10. Зразок №21

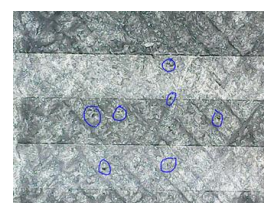


Рисунок 11. Зразок №22

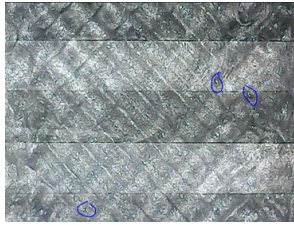


Рисунок 12. Зразок №23



Рисунок 13 Зразок №24



Рисунок 14. Зразок №25

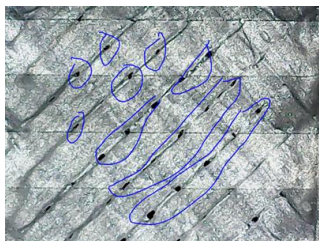


Рисунок 15. Зразок №31



Рисунок 16. Зразок №32



Рисунок 17. Зразок №33



Рисунок 18. Зразок №34



Рисунок 19. Зразок №35

При щільності заповненні 90% (рис. 10 та рис. 15) між нитками при друці утворюються значні порожнини, що порушують цілісність структури. Їх кількість зменшується при щільності заповнення 100%. Найбільш сприятлива структура утворюється при коефіцієнтах екструзії 1,05 та 1,10 з щільністю заповнення 100% при друці соплами діаметром 1,2 мм та 0,8 мм (рис. 12, 13, 17, 18). При коефіцієнті екструзії 1,15 при друці соплом діаметром 1,2 мм пластику видається настільки багато, що шари кладуться зі спотвореннями (рис. 19). Це додає міцності моделі, але збільшує навантаження на нагрівальну головку принтера.

Визначені параметри друку щодо товщини шару пластика, щільності заповнення та коефіцієнту екструзії використовувалися для створення зразків з різних матеріалів пластика, по яким визначалася можливість отримання остаточної форми моделі фрезеруванням. Для цього форма зразка (рис. 2) має трьохвимірний рельєф, що дає можливість виконувати фрезерування за трьома координатами та дослідити вплив властивостей матеріалу пластика на якість поверхні при різних напрямках руху інструменту.

Друк моделей виконувався при діаметрі сопла 1.2 мм, висоті шару 0,2 мм, коефіцієнті екструзії 1,10 та щільності заповнення 100%. При 3D-друку розміри моделі були збільшені на величину припуску для фрезерування. Траєкторія руху інструменту (рис. 20) передбачає обробку половини поверхні моделі для порівняння з отриманою після друку.

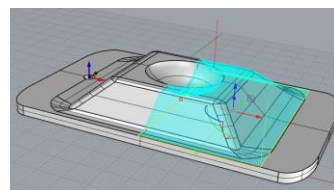


Рисунок 20. Траєкторія руху інструменту

Зразки для досліджень при фрезеруванні виготовляли з наступних пластиків ABS, CoPET, PLA, Nylon, PBT та PC.

Фрезерування проводилося двозубою фрезою зі сферичним торцем з частотою обертання шпинделя 12000 об/хв, подачею 0,01 мм/зуб, радіальною глибиною 0,7 мм, осьовою глибиною 0,3 мм.

Після обробки зразків з ABS (рис. 21) та PC - пластиків їх поверхні були гладкі та чисті, без похибок форми та незрізаних волокон.



Рисунок 21. Поверхня моделі з ABS-пластику

Після фрезерування зразків з CoPET пластику горизонтальні поверхні були гладкі та чисті. Похилі та внутрішні поверхні не гладкі та нерівні через затирання незрізаного пластику задньою поверхнею інструменту (рис. 22).



Рисунок 22. Поверхня моделі з CoPET пластику

При фрезеруванні зразків з PLA пластику відбувалося налипання стружки на різальну кромку інструменту (рис. 23), що робить процес різання неможливим.

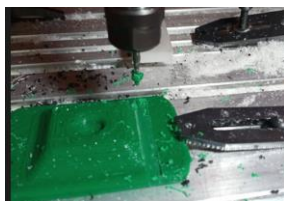


Рисунок 23. Наліплення PLA пластику на фрезу

При фрезеруванні зразків з Nylon і PBT пластику на їх поверхні залишалися волокна зі структури матеріалів, які не зрізалися (рис. 24).



Рисунок 24. Поверхня моделі з Nylon (а) та PBT пластику (б)

Результати фрезерування зразків з різних матеріалів наведені в табл. 3.

Таблиця 3 –Результати фрезерування зразків з різних пластиків

Матеріал	Можливість фрезерування	Якість поверхні (візуальна оцінка по шкалі від 1 до 5)	Примітка
ABS	так	5	Гарно обробляється
PC	так	5	Гарно обробляється
PLA	ні	-	Налипає на інструмент
CoPET	так	3	На похилих поверхнях утворюються затири задньою поверхнею фрези
PBT	так	1	Залишаються незрізані волокна пластику
Nylon	так	1	Залишаються незрізані волокна пластику

Як видно з табл. 3, найгірший результат після фрезерування було отримано для PLA-пластику. Його зовсім неможливо фрезерувати. Також не рекомендується виконувати після 3D-друку пост-обробку фрезеруванням таких пластиків, як Nylon та PBT. Фрезерування CoPET має обмеження в використанні.

Проведення досліджень по визначенню оптимальних режимів фрезерування для отримання точності розміру та якості поверхні на зразках з PC - пластику виконувалось з використанням твердосплавних кінцевих фрез (рис. 1).

Конструктивно тестова модель (рис. 3) має поверхні, точність яких неможливо отримати після 3D-друку і забезпечується фрезеруванням.

На ній є верхня плоска поверхня для торцевого фрезерування, отвір, карман з тонкою стінкою (товщина 1 мм) та зовнішня вертикальна поверхня із заокругленням та прямими кутами.

При фрезеруванні зразка прямозубою фрезою з частотою обертання шпинделя 12000 об/хв, подачею 0,02 мм/зуб, радіальною та осьовою глибиною 1 мм відбувалося налипання пластику на інструмент (рис. 25), що робить його використання неефективним



Рисунок 25 Пластик, що налип на прямозубу фрезу

При обробці спіральними фрезами з аналогічними режимами за програмою, коли врізання інструменту відбувалося прямолінійно (рис. 26, а), спостерігалось підплавлення пластику. При зміні напрямку врізання на кутове (рис. 26, б) цей недолік зникає.

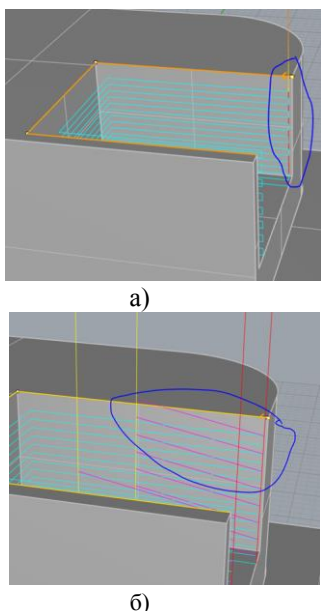


Рисунок 26. Рух інструменту при врізанні: прямолінійно (а) та під кутом (б)

При подальших дослідженнях використовувались спіральні кінцеві фрези.

Одна з проблем 3D-друку полягає в тому, що точність розміру не може бути вищою, ніж діаметр сопла. Крім того вона дуже залежить від типу поверхні та величини розміру. Так, наприклад, отвори до 3 мм при 3D-друці можуть бути менше 1 мм, а отвори більше 20 мм можуть бути з відхиленням до мінус 1 мм. Через особливості друку FDM методом отвори завжди мають відхилення в мінус від базового розміру, а лінійні розміри можуть мати відхилення як в плюс, так і в мінус.

Також друк FDM методом не може забезпечити виготовлення деталі зі стінкою, товщиною до 1 мм. Більшість програм-слайсерів роблять її товще, чим потрібно. Причина полягає у тому, що в налаштуваннях програми є параметр ширини екструзії, і він, зазвичай, ставиться трохи більше діаметра сопла, а товщина стінки повинна бути кратною цьому значенню. Для розмірів більше 5-ти діаметрів сопла, цей ефект не спричиняє великого відхилення, але розміри близькі до 1 мм друкуються дуже погано. Окрім того через недостатню адгезію між шарами матеріалу стінки утворюються не дуже міцними.

Дослідження можливостей фрезерування при забезпеченні потрібної точності моделі відбувалося на зразках (рис. 3) з пластику PC при отриманні товщини стінки 1 мм з одного боку та 18 мм з іншого. Фрезерування виконувалося трьохзубою спіральною

кінцевою фрезою з частотою обертання шпинделя 22000 об/хв, подачею 0,02 мм/зуб, радіальною глибиною різання 1 мм, осьовою глибиною різання 3 мм. На п'яти зразках після фрезерування мікрометром в трьох точках вимірюється розмір 18 мм та в двох точках – розмір 1 мм. Результати вимірювання наведені в табл. 4 та 5.

Таблиця 4 – Результати вимірювання на моделі розміру 18 мм після фрезерування

Номер зразка	Номер точки заміру			Розкид значення, мм	Найбільше відхилення від номіналу, мм
	1	2	3		
1	18,06	18,05	18,05	0,01	+0,06
2	18,05	18,04	18,04	0,01	+0,05
3	18,07	18,06	18,07	0,01	+0,07
4	18,07	18,07	18,07	0	+0,07
5	18,06	18,05	18,06	0,01	+0,06

Таблиця 5 – Результати вимірювання на моделі товщини стінки 1мм після фрезерування

Номер зразка	Номер точки заміру		Розкид значення, мм	Найбільше відхилення від номіналу, мм
	1	2		
1	1,16	1,17	0,01	+0,17
2	1,16	1,16	0	+0,16
3	1,15	1,15	0	+0,15
4	1,15	1,16	0,01	+0,16
5	1,16	1,16	0	+0,16

За результатами проведених досліджень можна сказати, що після фрезерування відхилення від прямолінійності обробленої поверхні до 0,01 мм. Точність розміру 18 мм відповідає 10 квалітету. Точність розміру 1 мм відповідає 13 квалітету. Але відхилення розміру в обох випадках позитивне.

Для визначення впливу режимів різання на шорсткість профрезерованої поверхні використовувався зразок (рис. 4), що складається з п'яти ділянок розміром 10x15 мм. Вихідна шорсткість поверхні PC-пластику після 3D-друку становить

Ra 17,6 мкм. Поверхні оброблених зразків досліджувались після фрезерування за двох умов:

- постійної частоти обертання шпинделя (15000 об/хв) і змінної подачі;
- постійної подачі (1800 мм/хв та 2700 мм/хв) та змінної частоти обертання шпинделя. Глибини різання були постійними: радіальна глибина 1 мм, осьова глибина 0,3 мм. Результати вимірювання шорсткості поверхонь після фрезерування однозубою та тризубою фрезою наведені в табл. 6.

Таблиця 6 – Результати вимірювання шорсткості оброблених поверхонь

Номер зразка	Номер ділянки на зразку.	S, мм/хв	n, об/хв	Ra, мкм
Однозуба фреза				
1	1	480	15000	2,47
	2	840	15000	2,29
	3	1200	15000	2,10
	4	1800	15000	1,82
	5	2700	15000	2,03
2	1	1800	18000	1,73
	2	1800	19000	1,63
	3	1800	20000	1,47
	4	1800	22000	1,21
	5	1800	24000	1,32
Трьохзуба фреза				
3	1	480	15000	1,08
	2	840	15000	1,02
	3	1200	15000	0,98
	4	1800	15000	0,87
	5	2700	15000	0,94
4	1	2700	18000	0,86
	2	2700	19000	0,84
	3	2700	20000	0,79
	4	2700	22000	0,64
	5	2700	24000	0,75

Дані табл. 6 показують, що шорсткість поверхні після 3D-друку, обробленої однозубою фрезою, зменшується на 85–93%. Після фрезерування надрукованої моделі трьохзубою фрезою шорсткість зменшується на 93–96%. Найменша шорсткість поверхні при фрезеруванні однозубою фрезою Ra 1,21 мкм отримана при частоті обертання шпинделя 22000 об/хв та подачі 1800 мм/хв. Найменша шорсткість поверхні при фрезеруванні трьохзубою фрезою Ra 0,64 мкм отримана при частоті обертання шпинделя 22000 об/хв та подачі 2700 мм/хв.

Висновки

За результатами проведених досліджень пост-обробки фрезеруванням зразків, отриманих 3D-друком FDM методом, можна зробити такі висновки.

1. Матеріали, які використовуються для 3D-друку, мають різну оброблюваність при фрезеруванні. Так, PLA пластик має відносно невисоку температуру плавлення і при цьому високу в'язкість, що спричиняє

налипання матеріалу на інструмент і унеможливорює обробку. При фрезеруванні Nylon та PBT пластиків на обробленій поверхні залишаються незрізані волокна. Фрезерування горизонтальних поверхонь зразків з CoPET(PETG) пластику дає рівну гладку поверхню, але при обробці похилих поверхонь утворюється похибка форми. Тому фрезерування цього матеріалу може мати обмежений характер. Кращі результати якості поверхні були отримані після фрезерування PC та ABS пластиків. Саме для цих матеріалів найбільш доцільно виконувати пост-обробку фрезеруванням.

2. При обробці поверхонь різними фрезами, було встановлено, що інструменти з прямими лезами не рекомендовано використовувати по пластику через налипання стружки. Фрези одно - та - трьохзубі зі спіральною канавкою показали добрі результати при обробці, але рекомендується при фрезеруванні використовувати діагональне або радіальне врізання в матеріал.

3. Найменша шорсткість поверхні при фрезеруванні зразків з PC-пластику однозубою фрезою отримана при частоті обертання шпинделя 22000 об/хв та подачі 1800 мм/хв. При фрезеруванні трьохзубою фрезою менша шорсткість отримана при частоті обертання шпинделя 22000 об/хв та подачі 2700 мм/хв.

4. При пост-обробці пластиків після 3D-друку фрезеруванням можливо досягти точності розмірів до 10 квалітету.

5. Розглянуто технологію пост-обробки моделей, створених 3D-друком, можна рекомендувати для виготовлення точних макетів, майстер-моделей для лиття, форм для формування деталей вакуумом і як закінчену пластикову деталь для одиничного та дрібносерійного виробництва.

Список літератури

1. Муравйов, О.В. Сучасний стан та перспективи розвитку адитивних технологій [Текст] / О.В. Муравйов, Ю.М. Нижник, В.Ф. Петрик, А.Г. Протасов, К.М. Серий // Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського; серія: Технічні науки. – 2021. – Том 32.– № 5. – С. 114 – 119.
2. Bryll, Katarzyna, et al. Polymer composite manufacturing by FDM 3D printing technology [Text] // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. – 2018. – Vol. 237.
3. 3D друк в умовах біомедичного використання [Електронний ресурс] : конспект лекцій з дисципліни «3D друк в умовах біомедичного використання» для студентів спеціальності 163 «Біомедична інженерія» денної та заочної форм навчання / уклад. Б. В. Єфременко. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – 56 с. / Режим доступу: <https://events.pstu.edu/bioart/wp-content/uploads/sites/3/2020/04/3d-printing-for-biomedical-applications-lec.pdf>
4. Williams, L. Additive Manufacturing or 3D Scanning and Printing, Manufacturing Engineering Handbook, 2nd ed. [Text] / L. Williams. McGraw-Hill Education, 2016. – 459 p.

5. Turner, B. N. A review of melt extrusion additive manufacturing processes [Text] / B. N. Turner, R. Strong, A. Scott // *Gold Rapid Prototyping Journal*. – 2014. – Vol. 0(3). – P. 192–204.
6. Bourella D. A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead [Electronic resource] / Bourella D., J. Beaman, M.C. Leub, D. Rossen // *RosencRapidTech US-Turkey Workshop on Rapid Technologies, Istanbul*. – 2009. Available at: https://www.researchgate.net/publication/304497852_A_brief_history_of_additive_manufacturing_and_the_2009_roadmap_for_additive_manufacturing_Looking_back_and_d_looking_ahead
7. Mohamed, O. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects [Text] / O.A. Mohamed, S.H. Masood, J.L. Bhowmik // *Advances in Manufacturing*. – 2015. – Vol. 3(1). – P. 42 – 53.
8. A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts / Z. Liu, Y. Wang, B. Wu, C. Cui, Y. Guo, C. Yan // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* – 2019. – Vol. 102(9). – P. 2877 – 2889.
9. Taufik M. Jain P. Part surface quality improvement studies in fused deposition modelling process: a review [Electronic resource] / M. Taufik, P. Jain // *Australian Journal of Mechanical Engineering*. – 2020. – P. 527 – 551. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/metrics/10.1080/14484846.2020.1723342?scroll=top> doi: 10.1080/14484846.2020.1723342
10. Chohan, J.S. Singh, R. Pre and post processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts: a state of art review and future applications. [Text] / J.S. Chohan, Singh, R. // *Rapid Prototyping Journal*. – 2017. – Vol. 3. – P. 495 – 513.
11. Boschetto, A. Finishing of Fused Deposition Modeling parts by CNC machining [Text] / A. Boschetto, L. Bottini, F. Veniali // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2016. – Vol. 41. – P. 92 – 101.
12. Diegel, O. Post-processing. In *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing* [Text] / Diegel O., Nordin A., Motte D., Springer: Singapore, 2019. P. 181–207.
13. Комісаров О.О. Матеріали для FDM-друку в Україні [Електронний ресурс] // О.О. Комісаров, Г.В. Пухальська / Тижень науки-2023. Машинобудівний факультет. Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 24-28 квітня 2023 р., НУЗП. – Запоріжжя, 2023. – С. 43-45 - 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM).- Електронне видання комбінованого використання на DVD-ROM.
14. Продукція Monofilament [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://monofilament.com.ua/ua/products/>
15. ABS+ пластик для 3D принтера [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://shop.plexiwire.com.ua/abs-plus-filament/>
16. Компанія «UKR-TOOLS» [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://ukr-tools.com/>

Одержано XX.XX.20XX

POST-PROCESSING OF DETAILS BY MILLING ON A CNC MACHINE AFTER 3D PRINTING BY THE SOLUTION METHOD

- Komisarov O. Post-graduate student of the Department of Mechanical Engineering Technology, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: Al.komissarov@meta.ua, ORCID 0009-0003-6285-3674
- Pukhalska H. PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Machinery Engineering Technology, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: puhalska66@gmail.com, ORCID 0000-0001-8118-4179
- Dyadya S. PhD, Associate Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: djadja@zp.edu.ua; ORCID 0000-0002-7457-7772

Purpose. Conduct research on the possibility of milling samples from various polymer materials after their production by 3D-printing Fused Deposition Modeling (FDM), determine the optimal milling modes that improve surface quality and dimensional accuracy.

Research methods. The roughness and accuracy of the samples of polymer materials, which were manufactured by the FDM method on a RepSystem V2.1 3D printer with the PrusaSlicer G-code creation program and processed with different modes on a Profi+Wood CNC milling machine, were experimentally determined. The accuracy of the dimensions was determined using a mechanical micrometer MK 25 GOST 6507-90 with an accuracy of 0,01 mm. A MikroView 500x digital microscope was used to examine the surface of the treated samples.

Results. The dimensional accuracy and surface roughness of printed samples made of polymer materials after processing with cutters of various designs with different cutting modes were determined.

Scientific novelty. The possibility of using mechanical processing by the method of milling of samples from various polymer materials used for 3D-printing was investigated.

Practical value. An analysis of milling cutters for processing was carried out and the possibility of their use for parts printed by the FDM method was tested. Recommended milling modes for materials used for 3D-printing, which significantly improve the quality of the surface: for a single-tooth cutter, the number of revolutions is 22,000 rpm and the feed is 1800 mm/min; for a three-tooth milling cutter: the number of revolutions is 22,000 rpm and the feed is 2,700 mm/min. When processing in these modes, the roughness is reduced by 95%. It has been established that during the post-processing of plastics after 3D-printing by milling, it is possible to achieve dimensional accuracy of up to 10 quality. Identified, polymer materials, products from which after FDM printing are recommended to be finished by milling for the production of accurate mock-ups, master models for casting, forms for forming parts by vacuum and as a finished plastic part for single and small-scale production.

Key words: Fused Deposition Modeling, 3D-printer, post-processing, milling, plastic, roughness, accuracy

References

1. Muravyov, O.V., Nyzhnyk, Yu.M., Petryk, V.F., Protasov, A.H., Seryi K.M. (2021) Suchasnij stan ta perspektivi rozvitku aditivnih tehnologij [Current state and prospects for the development of additive technologies]. Scholarly notes of V.I. Tavrii National University. Vernadskyi; series: Technical sciences, 32 (5), 114 – 119.
2. Bryll, K, et al. (2018) Polymer composite manufacturing by FDM 3D printing technology. MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, Vol. 237.
3. Yefremenko, B.V. ed. (2019). 3D druk v umovah biomedichnogo vikoristannya: konspekt lekcij z disciplini «3D druk v umovah biomedichnogo vikoristannya» dlya studentiv specialnosti 163 «Biomedichna inzheneriya» dennoyi ta zaochnoyi form navchannya [3D printing in conditions of biomedical use: synopsis of lectures on the discipline "3D printing in conditions of biomedical use" for students of specialty 163 "Biomedical engineering" of full-time and part-time forms of education]. Mariupol: DVNZ "PDTU", 56. Available at : <https://events.pstu.edu/bioart/wp-content/uploads/sites/3/2020/04/3d-printing-for-biomedical-applications-lec.pdf>
4. Williams, L. (2016). Additive Manufacturing or 3D Scanning and Printing, Manufacturing Engineering Handbook, 2nd ed. McGraw-Hill Education, 459.
5. Turner, B. N., Strong, R., Scott, A. (2014). A review of melt extrusion additive manufacturing processes. Gold Rapid Prototyping Journal, 10(3), 192–204.
6. Bourella D., Beaman J., Leub, M.C., Rossen, D. (2009). A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead. RosencRapidTech US-Turkey. Workshop on Rapid Technologies, Istanbul. Available at : https://www.researchgate.net/publication/304497852_A_brief_history_of_additive_manufacturing_and_the_2009_roadmap_for_additive_manufacturing_Looking_back_and_looking_ahead
7. Mohamed, O.A., Masood, S.H., Bhowmik, J.L. (2015). Advances in Manufacturing Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects, 3(1), 42 – 53.
8. Liu, Z., Wang, Y., Wu, B., Cui, C., Guo, Y. and Yan, C., (2019). A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 102(9), 2877-2889.
9. Mohammad Taufik & Prashant K. Jain (2020). Part surface quality improvement studies in fused deposition modelling process: a review, Australian Journal of Mechanical Engineering, 527 – 551, doi: 10.1080/14484846.2020.1723342. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/metrics/10.1080/14484846.2020.1723342?scroll=top>. doi: 10.1080/14484846.2020.1723342?scroll=top. doi:
10. Chohan, J.S. and Singh, R., (2017). Pre and post processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts: a state of art review and future applications. Rapid Prototyping Journal, 3, 495 – 513.
11. Boschetto, A., Bottini, L. and Veniali, F., (2016). Finishing of Fused Deposition Modeling parts by CNC machining. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 41, 92-101.
12. Diegel, O., Nordin A., Motte D. (2019). Post-processing. In A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing [Text., Springer: Singapore, 181-207.
13. Komisarov, O.O., Puhalska, G.V. (2023). Materiali dlya FDM-druku v Ukraini. [Materials for FDM printing in Ukraine]. Science Week-2023. Faculty of Mechanical Engineering. Abstracts of reports of the scientific and practical conference, April 24-28, Zaporizhzhia: NUZP, 43-45, 1 electron. wholesale disc (DVD-ROM). Electronic edition of combined use on DVD-ROM.
14. Production Monofilament. Available at : <https://monofilament.com.ua/ua/products/>
15. ABS+ plastic for 3D printer. Available at : <https://shop.plexiwire.com.ua/abs-plus-filament/>
16. Company “UKR-TOOLS”. Available at : <https://ukr-tools.com/>