

КУШНІРЧУК АНДРІЙХмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0002-5445-7378>
kyshnir98@gmail.com**ТКАЧУК ВІТАЛІЙ**Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0003-0640-2740>
tkachukvi@khmnu.edu.ua**ХАРЖЕВСЬКИЙ В'ЯЧЕСЛАВ**Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0003-4816-2781>
e-mail: kharzhevskiy@khmnu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЕОМЕТРІЇ ІНСТРУМЕНТУ ТА РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА ТОЧНІСТЬ ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ОТРИМАНИХ FDM ДРУКОМ

Метою цього дослідження є визначення найбільш оптимальних параметрів різального інструменту та режимів різання (частота обертання шпинделя, швидкість подачі, глибина різання, діаметр кінцевої фрези геометричні параметри ріжучої кромки) для механічного оброблення деталей отриманих FDM друком з CoPET (PETg) пластику з метою отримання заданих параметрів точності та шорсткості поверхні.

У статті викладено дослідження роботи кінцевих і торцевих фрез, що відрізняються матеріалом ріжучої частини, геометрією, кількістю різальних зубців, покриттям. В якості заготовки обрано прямокутну пластинку надруковану з CoPET пластику, без внутрішніх порожот, заповнення – 100%. Оброблення проводилося на вертикально-фрезерувальному верстаті MIKRON WF-2. Для кінцевих фрез досліджено процес різання при двох різних стратегіях: фрезерування відкритого пазу на всю робочу ширину фрези; фрезерування відкритого пазу бічною поверхнею фрези; фрезерування площини. Оцінено придатність для ефективного оброблення кожним типом інструменту.

Ключові слова: 3D друк, геометрія ріжучого інструменту, фрезерування, верстати з ЧПК, оброблення CoPET пластику.

KUSHNIRCHUK ANDRIY, TKACHUK VITALII, KHARZHEVSKYI VIACHESLAV
Khmelnytskyi National University

STUDY OF THE INFLUENCE OF TOOL GEOMETRY AND CUTTING MODES ON THE ACCURACY OF PROCESSING PARTS OBTAINED BY FDM PRINTING

FDM printing (rapid prototyping) is a production process during which you can quickly obtain parts with high geometric complexity, given dimensions and with low energy consumption. From the early stages, 3D printing was identified as a method of rapid prototyping of parts that have a high level of complexity and their manufacture by traditional methods (for example, mechanical processing on CNC machines) is impossible.

Despite the advantages that additive manufacturing offers, it has not yet been incorporated into industrial mass production lines as an alternative to traditional technologies, due to the long manufacturing time of parts and the lack of repeatability. In some cases this may not be a serious problem, but in some industrial applications where high precision parts are required, there are limitations due to the surface roughness of the outer layer and the accuracy requirements. To eliminate these shortcomings, an additional processing process is required.

The purpose of this study is to determine the most optimal parameters of the cutting tool and cutting modes (spindle rotation frequency, feed rate, depth of cut, diameter of the end mill, geometric parameters of the cutting edge) for mechanical processing of parts obtained by FDM printing from CoPET (PETg) plastic in order to obtain the specified parameters accuracy and surface roughness.

The article describes the study of the work of four types of end mills, which differ in the material of the cutting part, geometry, number of cutting teeth, coating. A rectangular prism printed from CoPET plastic, without internal voids, 100% filling, was selected as a blank. Processing was carried out on a MIKRON WF-2 vertical milling machine. For end mills, the cutting process was investigated with two different strategies: milling of a closed groove over the entire working width of the mill; milling of an open groove with the side surface of the cutter. The suitability for effective processing of each type of tool is evaluated.

Results were recorded and evaluated using an optical electron microscope.

Keywords: 3D printing, cutting tool geometry, milling, CNC machines, CoPET plastic processing.

Постановка проблеми

У наш час машинобудівна продукція стає все більш складною та вимагає виконання більшої кількості завдань на етапах проектування та виготовлення. Зокрема, геометрично складні конструкції існують у різних машинах та механізмах, таких як верстатобудування, авіабудування та автомобілебудування [1,2]. Наприклад, компоненти транспортних засобів удосконалюються, і тому було відмічено багато труднощів у виробництві складних деталей, які є життєво важливими в промисловості. Швидке прототипування (rapid prototyping - RP), яке ще називають адитивним виробництвом, є основою для великої кількості виробничих методів, які передбачають пошарове з'єднання матеріалів. Крім того, скорочення матеріальних відходів, часу, вартості та помилок є одними з головних переваг RP, завдяки чому можна виготовляти складні деталі за допомогою таких технологій [3]. За останні кілька років були зроблені машини FDM, які можуть виготовляти вироби з високою точністю та меншою похибкою [4]. Наприклад,

розробка 4-х і 5-осьових 3D-принтерів FDM або зміна роботи з декартовими координатами на дельта-робота дає більше свободи та жорсткі допуски [5]. Ці зміни можуть зменшити похибки розмірів, дефекти тощо, але не можуть їх виключити повністю та забезпечити точність і якість, які може забезпечити механічне оброблення.

Це особливо важливо для функціональних деталей, які вимагають додаткових операцій постоброблення, таких як фрезерування. CoPET є одним із найбільш поширених матеріалів у 3D-друці через свою низьку вартість, простоту друку та стійкість до багатьох агресивних чинників. Однак CoPET має гіршу поверхню (присутні розтягнуті залишки філаменту) порівняно з іншими інженерними пластмасами, що може призводити до погіршення зовнішнього вигляду, а також труднощів у процесах постоброблення.

Для подолання проблем із забезпеченням високої якості поверхні та точності розмірів деталей, отриманих FDM друком, пропонується застосовувати механічне постоброблення. Ключове значення має вибір ріжучого інструменту та параметрів різання при фрезеруванні деталей з CoPET. Вибір інструменту та налаштування параметрів може суттєво впливати на продуктивність, ефективність обробки і якість кінцевого виробу. Хоча існують різні типи ріжучих інструментів та налаштування, які можна застосовувати для фрезерування деталей, їх ефективність краще оцінювати через експерименти. Отже, вибір відповідного різального інструменту та параметрів різання є вирішальним для досягнення якісного оброблення поверхні та точності розмірів фрезерованих деталей з CoPET.

Метою роботи було дослідження впливу геометрії різального інструменту, типу покриття та режимів різання на точність і шорсткість оброблених поверхонь деталей отриманих FDM друком.

Виклад основного матеріалу

Оброблення деталей з CoPET, вимагає особливих умов через низьку термічну стабільність матеріалу, що може призвести до плавлення, деформації та поганого оброблення поверхні. Для подолання цих викликів, важливим є вибір відповідного різального інструменту та параметрів різання, для досягнення якісного оброблення поверхні та точності розмірів фрезерованих деталей. Вибір різального інструменту та параметрів різання може значно впливати на продуктивність та ефективність оброблення, а також якість кінцевого продукту. Було проведено серію експериментів з використанням різних ріжучих інструментів, щоб оцінити їх ефективність при обробленні деталей із CoPET.

Для проведення експериментів було обрано чотири види кінцевих фрез, що відрізняються матеріалом ріжучої частини, геометрією, кількістю різальних зубців, покриттями. Також три види пластинок для торцевої фрези.

В дослідженні використано чотири види кінцевих фрез діаметром 8мм. (Рис.1).



Рис. 1 Кінцеві фрези

Для оброблення площин використано торцеву фрезу із корпусом PE01.11B32.100.10 та пластинки типу ARMT 1135 трьох видів (Рис.2).



Рис. 2 Змінні пластинки для встановлення у корпусі торцевої фрези PE01.11B32.100.10

Параметри ріжучих інструментів та змінних пластин наведено в таблицях 1 та 2.

У якості заготовки обрано надруковано прямокутну пластику з CoPET без внутрішніх порожот. Для її виготовлення використано FDM принтер Artillery sidewinder x1, діаметр сопла – 0,4мм. Режими друку: температура сопла – 245°C; температура столу - 90°C; висота шару – 0,25мм; швидкість друку – 75мм/с; кількість зовнішніх шарів – 2. Тип заповнення – Rectilinear 100 % (шари накладались з перехресуванням в 90°).

Параметри ріжучих інструментів та змінних пластин



№ інструмента	d – діаметр хвостовика, мм	D – діаметр робочої частини, мм	L – довжина загальна, мм	l – довжина робоча, мм	α – кут підйому гвинтової лінії, град	z – кількість ріжучих зубців	Матеріал/покриття
1	8	8	60	25	40	3	Твердий сплав/полірований
2	8	8	62	20	35	4	HSS/TiAlN
3	8	8	65	22	45	6	Твердий сплав/B4C
4	8	8	45	18	35	3	Твердий сплав/без покриття

Таблиця 2

Характеристики змінних пластинок



№ пластинки	Маркування	Задній кут, град	Радіус різальної кромки, мм	Матеріал
1	APMT113508PDER	11	0,8	BL2060
2	APMT1135PDER	11	1	P6320
3	APKT1135PDFR-MA	11	0	K01

Кут L4- 85°
Кут L3 - 11°
L1 = 11 мм
L2 = 6,35 мм
F1 = 1.5 мм
S1 = 3.5 мм
Re = 0.8 мм

Оброблення проводилось на вертикально-фрезерувальному верстаті MIKRON WF-2. До основних характеристик відносяться: зона оброблення 400 [мм] по осі X; 4000 [мм] по осі Y; 400 [мм] по осі Z. Максимальна частота обертання шпинделя становить 2240 [об/хв]. Основне застосування верстата - для виробництва деталей середньої та високої точності з допуском до 0,01 [мм]. Загалом охолоджуючі рідини не потрібні для оброблення більшості термопластичних матеріалів.

Першим етапом досліджень було оброблення кінцевими фрезами двох різних елементів поверхні: фрезерування відкритого пазу на всю робочу ширину фрези; фрезерування відкритого пазу бічною поверхнею фрези.

Механічне оброблення проводиться на вертикально-фрезерувальному верстаті MIKRON WF-2, закріплення фрези – цанговий патрон ER32; закріплення заготовки – в лещатах; глибина різання – 5мм. Для оцінки процесу обрано середні значення режимів: Оберти для фрези Ø8мм – 1125об/хв.; Подача – 250 мм/хв. Виконано фрезерування кожним інструментом відкритого пазу та уступу, результати занесені до таблиць 3,4.

Вид оброблення: відкритий паз; перекриття – 100%; глибина різання – 5мм.

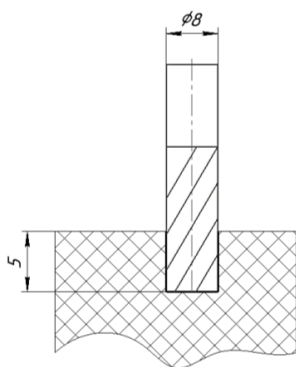


Рис. 1. Схема оброблення - відкритий паз

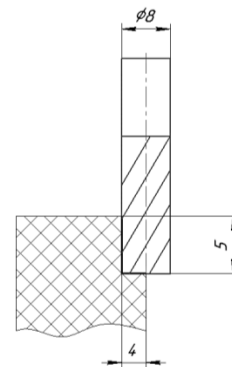


Рис. 2. Схема оброблення - уступ

Таблиця 3

Результати оброблення відкритого пазу





Інструмент	Зовнішній вигляд	Отриманий розмір, мм	Інструмент	Зовнішній вигляд	Отриманий розмір, мм
№1		8,00	№2		7,99
№3		8,00	№4		8,01

Найкращий результат оброблення було досягнуто при використанні фрези з твердого сплаву з полірованою поверхнею, частково придатним також виявився інструмент з швидкорізальної сталі HSS. Фреза з найкращим результатом досліджувалась при різних обертах і подачах для визначення оптимальних режимів різання.

Наступним кроком було оброблення уступу: перекриття – 50%; глибина різання – 5мм.

Таблиця 4

Результати оброблення уступу

Інструмент	Зовнішній вигляд	Інструмент	Зовнішній вигляд
№1		№2	
№3		№4	






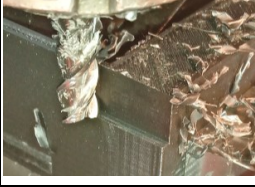




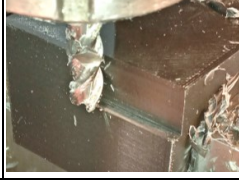

Найкращі результати за такими параметрами як: чистота поверхні, відсутність налипання стружки на інструмент та заготовку, отриманий розмір, досягнуто при використанні фрези №1. Для уточнення оптимальних обертів шпинделя і подачі, виконано серію дослідів з використанням таких режимів: Оберти шпинделя, об/хв -400, 800, 1600, 2240; Подача, мм/хв – 125, 250, 400. Результати наведені в таблиці 5.

Найбільшу точність розмірів при обробленні та якість поверхні було досягнуто використовуючи фрезу з твердого сплаву із полірованою поверхнею. За результатами досліджень встановлено найкращі режими різання для даної фрези Ø8 мм: оберти шпинделя – 2240 об/хв; подача - 400 мм/хв.

Наступним етапом було дослідження оброблення площини збірною фрезою із змінними пластинками. Механічне оброблення проводилось на вертикально-фрезерувальному верстаті МІКРОН WF-2, використано торцеву фрезу Ø63мм, із 4-ма пластинками, закріплення фрези – оправка Ø22мм, закріплення заготовки – у лещатах. Для оцінки процесу обрано середні значення режимів: оберти фрези Ø63мм – 800об/хв.; подача – 250 мм/хв. Виконано фрезерування кожним видом пластинок, результати занесені до таблиці 6.

Таблиця 5

Результати оброблення уступу

Подача, мм/хв	Оберти, об/хв			
	400	800	1600	2240
125				
250				
400				

Таблиця 6



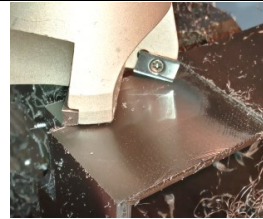

Результати дослідження фрезерування площини торцевою фрезою із змінними пластинками

Пластинка	Зовнішній вигляд		
№1			№2
			
№3			

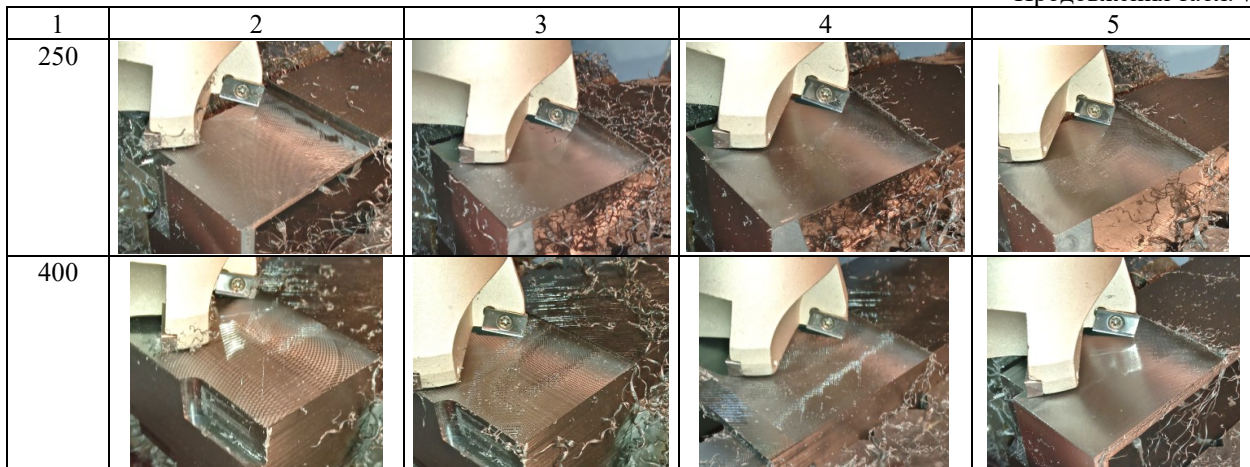
Найкращі результати за такими параметрами як: чистота поверхні, відсутність налипання стружки на інструмент та заготовку, досягнуто при використанні пластинок №3 (АРКТ1135PDFR-МА). Для уточнення оптимальних обертів шпинделя і подачі, виконано серію дослідів з використанням таких режимів: Оберти шпинделя, об/хв -400, 800, 1600, 2240; Подача, мм/хв – 125, 250, 400. Результати занесено в таблицю 7.

Таблиця 7

Результати оброблення пластинками №3 (АРКТ1135PDFR-МА) на різних режимах.

Подача, мм/хв	Оберти, об/хв			
	400	800	1600	2240
1	2	3	4	5
125				

Продовження табл. 7



Висновки

Аналіз літературних джерел дозволив встановити, що важко отримати низьку шорсткість та високу точність розмірів під час процесу FDM-друку через властиві технологічні обмеження. Таким чином, щоб отримати поверхню кращої якості, необхідно виконати додатковий процес механічного оброблення і це було основною метою даного дослідження, яке буде корисним для користувачів 3D-принтерів, яким потрібне механічне оброблення зразків для підвищення якості поверхні деталей.

Проаналізувавши результати досліджень – фрезерування пластикових деталей отриманих FDM-друком із матеріалу CoPET було встановлено, що найбільша точність та якість оброблених поверхонь (паза та уступу) можна досягнути при використанні фрези з твердого сплаву з полірованою поверхнею, частково придатним також виявився інструмент із швидкорізальної сталі HSS. Також встановлено найкращі режими різання, які відповідають обертам шпинделя – 2240 об/хв; та подачі - 400 мм/хв.

При фрезеруванні площин деталей збірною фрезою Ø63мм найкращий результат отримано при використанні змінних пластинок APKT1135PDFR-MA, обертів шпинделя – 1600 об/хв та подачі - 125 мм/хв.

References

1. Ghaffar, S.H.; Corker, J.; Fan, M. Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. *Autom. Constr.* 2018, 93, 1–11. [Google Scholar] [CrossRef]
2. Bose, S.; Ke, D.; Sahasrabudhe, H.; Bandyopadhyay, A. Additive manufacturing of biomaterials. *Prog. Mater. Sci.* 2018, 93, 45–111. [Google Scholar] [CrossRef]
3. Lalegani Dezaki, M., Mohd Ariffin, M. K. A., & Baharuddin, B. T. H. T. “Experimental study of drilling 3D printed polylactic acid (PLA) in FDM process”. *Fused Deposition Modeling Based 3D Printing*, Pages 85-106, 2021.
4. Kuruoğlu Y, Akgün M & Demir H. “Modelling and optimization of surface roughness and tensile strength of ABS, PLA and PETG samples produced by FDM method”. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, Vol. 6, Issue 3, Pages 358-369, 2022
5. Wulle, F.; Coupek, D.; Schäffner, F.; Verl, A.; Oberhofer, F.; Maier, T. Workpiece and Machine Design in Additive Manufacturing for Multi-Axis Fused Deposition Modeling. *Procedia CIRP* 2017, 60, 229–234. [Google Scholar] [CrossRef]