

АНОТАЦІЯ

Кушнірчук А. С. Технологічне забезпечення якості деталей машин, отриманих з пластмас методом 3D-друку – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 – Прикладна механіка. – Хмельницький національний університет. – м. Хмельницький, 2025.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічної задачі технологічного забезпечення якості деталей машин, отриманих 3D-друком.

Об'єктом дослідження є процес завершальної механічного оброблення поверхонь деталей, отриманих 3D-друком з ABS та CoPET (PETg) пластику.

Предметом дослідження є технологічні параметри забезпечення якості деталей, отриманих FDM-друком, завдяки комплексному підходу до якості виробу, що включає в себе: точність відповідальних поверхонь згідно з технічними вимогами, необхідну шорсткість, міцностні характеристики матеріала, дизайн форми з мінімізацією маси деталі.

У вступі представлено загальну характеристику дослідження, обґрунтовано його актуальність, визначено зв'язок із науковими програмами, планами та тематиками. Також окреслено мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, висвітлено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок автора, подано інформацію про апробацію, публікації, структуру й обсяг роботи.

Вирішення науково-технічної задачі, а саме забезпечення технологічних параметрів якості деталей, отриманих FDM-друком, завдяки комплексному підходу до якості виробу, що включає в себе: точність відповідальних поверхонь згідно з технічними вимогами, необхідну шорсткість, міцностні характеристики матеріалу, дизайн форми з мінімізацією маси деталі є актуальним завданням.

У першому розділі здійснено системний аналіз технологічних параметрів

якості деталей, отриманих FDM-друком, а саме: демонструється ефективність застосування деталей машин, отриманих 3D-друком, але в багатьох випадках до якості та точності поверхні пред'являються високі вимоги та необхідною є постоброблення поверхонь для надання якісного дизайну виробу або точності виконавчих розмірів з низькою шорсткістю поверхні.

При аналізі використаних джерел встановлено, що отримати низьку малу шорсткість та високу точність розмірів відповідальних поверхонь після процесу FDM-друку виробу важко через технологічні особливості роботи обладнання друку та властиві йому обмеження. Таким чином, щоб отримати поверхню кращої якості та вищої точності, необхідно виконати додатковий процес механічного оброблення відповідальних поверхонь. З аналізу результатів, що були отримані різними авторами при проведенні теоретичних та експериментальних досліджень процесу виготовлення виробів методом 3D-друку, було встановлено, що основний вплив на якість поверхні виробів здійснюють такі фактори як: характеристики процесу друку, вибір матеріалу для друку та постоброблення поверхонь для отримання необхідної шорсткості та точності відповідальних поверхонь.

На основі аналізу літературних джерел та патентного огляду було сформульовано мету дослідження й визначено завдання для її досягнення.

У другому розділі визначено основні фактори, що діють при обробленні обточуванням та фрезеруванням високоточних поверхонь виробу, отриманого 3D-друком.

Проаналізовано аналітичні моделі процесу різання матеріалів з пластмаси з урахуванням пружних деформацій поверхні виробу.

Проаналізовано особливості процесу фрезерування пластмас після 3D-друку на верстатах з ЧПК. У результаті проведеного аналізу виявлено, що процес оптимальної стратегії оброблення її поверхонь потребує удосконалення з урахування його нестационарності і замкненості та необхідності розробити певний алгоритм розрахунку траєкторії руху інструмента, який враховує процеси, що протікають при утворенні поверхні деталі та застосовувати

програмне забезпечення, що дозволить управляти процесом оброблення за заданим алгоритмом.

Розробка та використання цих компонентів при проєктуванні керуючої програми дозволить компенсувати похибку, викликану пружними деформаціями і підвищити продуктивність оброблення.

Наведено результати прогнозованого оброблення деталі при оптимальній стратегії оброблення її поверхонь, яка при заданій висоті гребінця шорсткості забезпечує найменший час оброблення.

При цьому отримані такі наукові результати:

1. Отримала подальший розвиток побудова математичної моделі процесу різання обточуванням та фрезеруванням поверхонь деталей з пластмас, виготовлених 3D-друком з урахуванням пружних відтискань поверхонь матеріалу. Отримані результати у вигляді номограм дають можливість прогнозувати неточність розмірів поверхонь при різних видах оброблення для матеріалів, отриманих 3D-друком, при чистових та чорнових режимах різання;

2. Отримав подальший розвиток процес визначення механічних характеристик зразків, надрукованих за допомогою адитивних технологій FDM. Встановлено, що зниження внутрішнього заповнення матеріалу пропорційно зменшує межу міцності зразка. ABS-пластик виявився менш міцним на розрив у порівнянні з CoPET-пластиком. При дослідженні діаграм руйнувань зафіксовано пластичну поведінку у зразків з CoPET, тоді як зразки з ABS демонструють крихке руйнування. При дослідженні пар тертя найкращий результат було отримано в парі матеріалів ABS та CoPET, величина зношування склала 30 мкм, що робить таку пару тертя найбільш оптимальним вибором.

3. Експериментально визначені співвідношення параметрів режимів різання та конструктивних особливостей різального інструменту, що забезпечують найбільшу точність та малу шорсткість відповідальних поверхонь деталей, отриманих 3D - друком.

У третьому розділі представлено загальну методологію проведених

досліджень, яка ґрунтується на системному підході до розв’язання визначеного науково-технічного завдання. У рамках дисертаційного дослідження була вдосконалена експериментальна установка для моделювання фізичних процесів тертя зразків із пластмас у взаємодії з контртілом. Вибрано обладнання та характеристики різального інструменту для процесів обточування та фрезерування на верстатах з ЧПК. Для проведення дослідження характеристик міцності зразків з пластмас ABS і CoPET використано розривну машину УММ-5. Для вимірювання точності та шорсткості виготовлення відповідальних поверхонь описано вимірювальні прилади. Наведено методологію оптимізації конструкції деталей машин для ефективного адитивного виробництва за допомогою SolidWorks Simulation. Вибрано конструкцію поворотного стола з метою модернізації, для розширення технологічних можливостей фрезерних верстатів з ЧПК. Наведено методологію оброблення даних отриманих в процесі експериментів та оцінку точності отриманих результатів.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень, які показали, що 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: швидкість різання – 56м/хв; оберти шпинделя – 2240 об/хв; подача - 400 мм/хв.

Проаналізувавши результати досліджень – фрезерування пластикових деталей, отриманих FDM-друком із матеріалу CoPET, – було встановлено, що найбільшу точність та якість оброблених поверхонь (паза та уступу) можна досягнути при використанні фрез із полірованою поверхнею для обробки кольорових матеріалів, частково придатним також виявився інструмент зі швидкорізальної сталі HSS. Встановлено, що при рекомендованих режимах різання при чорновому обточуванні пластмас з CoPET із глибиною різання $t = 3$ мм температура в зоні різання не перевищує $70,9^{\circ}\text{C}$, тоді як температура, при якій пластик починає змінювати свої механічні властивості становить 90°C .

У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що величини зношування пар тертя, отриманих за допомогою FDM-друку із ABS та CoPet пластику, розрізняються. Найкращий результат було отримано в парі матеріалів ABS та CoPET, величина зносу склала 30 мкм, що робить таку пару тертя найбільш оптимальним вибором серед пар, що досліджувались.

На основі результатів дисертаційної роботи спроектовано та виготовлено деталі для модернізації конструкції поворотного стола для підвищення ефективності застосування верстатів з ЧПК.

Із застосуванням програмного продукта SolidWorks проведена топологічна оптимізація за допомогою генеративного дизайну, яка дозволяє отримати кінцевий продукт в оптимізованому виконанні. Це знижує масу деталі від 40 до 60% при збереженні всіх статичних характеристик, що дозволяє економити на матеріалах, скоротити час на підготовку виробництва і зменшити обсяги механічного оброблення.

Практичне значення отриманих результатів для машинобудування полягає: у створенні методології вибору режимів різання для деталей машин, отриманих 3D-друком, на чорнових та чистових операціях; рекомендації з результатів експериментальних досліджень величини зношування пар тертя, отриманих за допомогою FDM-друку із ABS та CoPET пластику, дають можливість визначати кращі пари тертя щодо зносостійкості поверхонь; у застосуванні модернізованого поворотного стола для фрезерних робіт на верстатах з ЧПК, що підвищує точність оброблення поверхонь деталі; у застосуванні топологічної оптимізації за допомогою генеративного дизайну у SolidWorks, що дозволяє отримати кінцевий продукт в оптимізованому виконанні, що знижує масу деталі від 40 до 60% при збереженні всіх статичних характеристик та дозволяє економити на матеріалах, скоротити час на підготовку виробництва і зменшити обсяги механічного оброблення.

Ключові слова: якості деталей машин, отриманих 3D-друком, точність, шорсткість, математичне моделювання, проектування.

Результати дисертаційних досліджень були опубліковані в 11 наукових

працях.

**Опубліковані праці, в яких представлено основні наукові результати
дисертації:**

Статті у журналах, що включені до переліку фахових видань України:

1. Кушнірчук А. С., Ткачук В. П. Дослідження впливу геометрії інструменту та режимів різання на точність оброблення деталей отриманих FDM друком. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. №6. 2023. С. 217–222. *Досліджено вплив геометрії інструменту та режимів різання на точність оброблення деталей отриманих FDM друком.*
2. Кушнірчук А. С., Ткачук В. П. Аналіз впливу режимів різання на точність розмірів поверхонь деталей, виготовлених FDM друком, що оброблюються точінням та фрезеруванням з урахуванням їх пружних деформацій. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. №3. 2024. С. 451–460. *Отримала подальший розвиток побудова побудова аналітичної моделі процесу оброблення поверхонь деталей з пластмас, отриманих 3D-друком, у порівнянні з процесом різання металів з урахуванням низької пружності матеріалу.*
3. Каразей В. Д., Соколан К. С., Кушнірчук А. С., Калінін О. В. Модернізація поворотного стола для верстата з ЧПК. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2021. № 6. С.141–146. *Проведено модернізацію поворотного стола для верстата з ЧПК для підвищення точності оброблення поверхонь складної форми.*
4. Кушнірчук А. С. Оптимізація конструкції деталей машин для ефективного адитивного виробництва за допомогою SOLIDWORKS SIMULATION. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. №4. 2024. С. 497–502. *Наведено методологію оптимізації конструкції деталей машин для ефективного адитивного виробництва за допомогою SolidWorks Simulation.*
5. Кушнірчук А. С., Ткачук В. П., Харжевський В. О. Дослідження міцнісних характеристик деталей отриманих за допомогою FDM друку із ABS та COPET пластику. Міжвузівський збірник наукових праць (за галузями знань «Фізико-математичні

науки» та «Технічні науки»). Луцьк. Випуск 76. 2023 С. 147–152. *Наведено результати дослідження міцнісних характеристик деталей отриманих за допомогою FDM друку із ABS та COPET пластику.*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Кушнірчук А. С. Адитивні технології в ливарному виробництві. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем, 26–27 травня 2022 р. м. Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка» 2022. Т. 1. С. 105–106. *Вказано напрямки застосування адитивних технологій в ливарному виробництві.*
7. Кушнірчук А. С. Установка для дослідження на зносостійкість тіл отриманих FDM друком. The 9th International scientific and practical conference “Modern research in world science”, November 28-30, 2022. Lviv, Ukraine. 2022. pp. 506 -509. *Описано конструкцію установки для дослідження на зносостійкість тіл отриманих FDM друком.*
8. Кушнірчук А. С., Ткачук В. П. Механічна обробка деталей отриманих FDM друком. Х Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти та молодих вчених з автоматичного управління присвячена Дню ракетно-космічної галузі України, 12 квітня 2023 р. Херсон-Хмельницький: ХНТУ, 2023. С. 155–156. *Наведено результати механічної обробки деталей отриманих FDM друком.*
9. Кушнірчук А. С. Аналіз геометричної точності після механічної обробки деталей отриманих FDM друком. XIII Міжнародна науково-практична конференції м. Чернігів, 25–26 травня 2023 р. : у 2 т. : Національний університет «Чернігівська політехніка» НУ «Чернігівська політехніка», 2023. Т. 1. С. 196–197. *Наведено результати аналізу геометричної точності поверхонь після механічної обробки деталей отриманих FDM друком.*
10. Кушнірчук А. С., Ткачук В. П. Фрезерування деталей отриманих FDM друком. XII Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні технології у машинобудуванні АТМЕ-2024», Івано-Франківськ – Яремче, 5-9 лютого 2024 р. С. 138–139. *Наведено результати фрезерування деталей по точності після механічного оброблення деталей отриманих FDM друком.*

11. Кушнірчук А. С., Аналіз та вибір стратегії чистової та чорнової обробки елементів заготовок складної геометричної форми в SolidCAM the. Materials of the XIV International Scientific and Practical Conference «INTERNATIONAL FORUM: PROBLEMS AND SCIENTIFIC SOLUTIONS» (January 16-18, 2025; Melbourne, Australia). С. 291-302 *Проведено аналіз та моделювання стратегії чистового та чорнового оброблення елементів заготовок складної геометричної форми у SolidCAM.*

SUMMARY

Kushnirchuk A. S. Technological quality assurance of machine parts made of plastics using 3D printing – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 131 – Applied Mechanics. – Khmelnytskyi National University. – Khmelnytskyi, 2024.

The dissertation is devoted to solving the scientific and technical problem of technological quality assurance of machine parts obtained by 3D- printing.

The object of the study is the process of final mechanical treatment of the surfaces of parts obtained by 3D- printing from ABS and CoPET (PETg)- plastic.

The subject of the study is the technological parameters of ensuring the quality of parts obtained by FDM- printing, thanks to an integrated approach to product quality, which includes: the accuracy of critical surfaces according to technical requirements, the required roughness, the strength characteristics of the material, the design of the form with minimization of the mass of the part.

The introduction provides a general description of the work, justifies the relevance of the research topic, reveals the connection of the work with scientific programs, plans and topics, formulates the goal, tasks, object and subject of the research, indicates the scientific novelty and practical significance of the results obtained, determines the personal contribution of the applicant, provides data on testing, publications, structure and scope of work.

Solving the scientific and technical problem, namely ensuring the technological parameters of the quality of parts obtained by FDM- printing, thanks to an integrated approach to product quality, which includes: the accuracy of critical surfaces according to technical requirements, the required roughness, strength characteristics of the material, shape design with minimization of the mass of the part is a relevant task.

The first section presents a systematic analysis of the technological parameters of the quality of parts obtained by FDM-printing, namely: demonstrates the effectiveness of the use of machine parts obtained by 3D- printing, but in many cases, high requirements are placed on the quality and accuracy of the surface and require post-processing of surfaces to provide high-quality product design or accuracy of executive dimensions with low surface roughness.

When analyzing the sources used, it was established that obtaining low roughness and high accuracy of the dimensions of critical surfaces after the FDM-printing process of the product is difficult due to the technological features of the printing equipment and its inherent limitations. Thus, in order to obtain a surface of better quality and higher accuracy, it is necessary to perform an additional process of mechanical processing of critical surfaces. From the analysis of the results of theoretical and experimental studies of various authors of the process of manufacturing products using 3D- printing, it was established that the main parameters that affect the quality of the surface of products are: the characteristics of the printing process, the choice of material for printing and post-processing of surfaces to obtain the required roughness and accuracy of critical surfaces.

The results of the analysis of literary sources and patent review made it possible to formulate the goal and objectives to achieve the set goal.

The second section identifies the main physical factors that act during the processing of high-precision surfaces of a product obtained by 3D- printing by turning and milling.

An analytical model of the process of cutting plastic materials was built and analyzed, taking into account elastic deformations of the product surface.

The features of the process of milling plastics after 3D-printing on CNC machines were analyzed. As a result of the analysis, it was found that the process of the optimal strategy for processing its surfaces requires improvement, taking into account its non-stationarity and closedness and the need to develop an algorithm for calculating the trajectory of the tool movement that takes into account the processes that occur during the formation of the surface of the part and to apply software that will allow controlling the processing process according to a given algorithm. The development and use of these components in the design of the control program will allow to compensate for the error caused by elastic deformations and increase the processing productivity. The results of the predicted processing of the part with the optimal strategy for processing its surfaces, which at a given comb height provides the shortest processing time, are presented.

The following scientific results were obtained:

1. The construction of a mathematical model of the process of cutting by turning and milling the surfaces of plastic parts made by 3D-printing has been further developed in comparison with the process of cutting metals, taking into account elastic extrusions of the material surfaces. The results obtained in the form of nomograms make it possible to predict the inaccuracy of the dimensions of surfaces during various types of processing for materials obtained by 3D-printing, in finishing and roughing cutting modes;

2. The process of determining the mechanical characteristics of samples printed using additive FDM-technologies has been further developed. It has been established that a decrease in the internal filling of the material proportionally reduces the strength limit of the sample. ABS-plastic turned out to be less strong at break compared to CoPet plastic. When studying the fracture diagrams, plastic behavior was observed in samples made of CoPet, while samples made of ABS demonstrate brittle fracture.

3. Experimentally determined ratios of parameters of cutting modes and design features of the cutting tool, which ensure the highest accuracy and low roughness of critical surfaces of parts obtained by 3D-printing at optimal cutting temperatures.

The third section describes the general methodology of the research conducted

in the work, which is based on a systematic approach to solving the scientific and technical tasks set.

For the process of performing the dissertation research, an experimental setup was developed for modeling the physical processes of friction of plastic samples with a counterbody. The equipment and characteristics of the cutting tool were selected for the processes of turning and milling on CNC-machines. To study the strength characteristics of samples made of ABS and CoPet plastics, a UM-5 bursting machine was used. Measuring instruments are described for measuring the accuracy and roughness of manufacturing critical surfaces. The methodology for optimizing the design of machine parts for effective additive manufacturing using SolidWorks Simulation is presented. The design of the rotary table is selected for the purpose of modernization to expand the technological capabilities of CNC-milling machines. The methodology for analyzing experimental data and assessing the accuracy of the results obtained is presented.

The fourth section presents the results of experimental studies that showed that the highest dimensional accuracy during machining and surface quality were achieved using a hard alloy milling cutter with a polished surface. According to the results of the studies, the best cutting modes for this Ø8 mm milling cutter were established: spindle speed - 2240 rpm; feed - 400 mm/min. After analyzing the results of the research - milling plastic parts obtained by FDM-printing from CoPET material, it was found that the highest accuracy and quality of the machined surfaces (groove and ledge) can be achieved when using a hard alloy cutter with a polished surface, a tool made of high-speed steel HSS was also partially suitable. The best cutting modes were also established, which correspond to the spindle speed - 2240 rpm; and feed - 400 mm/min. It was established that at the recommended cutting speeds during rough turning of CoPET-plastics (the temperature at which the plastic begins to soften is 190°C) with a cutting depth of $t = 3$ mm, the temperature in the cutting zone does not exceed 70.9°C, which indicates that the surface layer of the surface is not disturbed with the required roughness and the required productivity of the processing process is achieved. As a result of the conducted experimental studies, it was found that the wear

values of friction pairs obtained by FDM-printing from ABS and COPET-plastic differ in their ability to wear surfaces. The best result was obtained in the pair of ABS+ and CoPet materials, the wear value was 30 microns, which makes such a friction pair the most optimal choice among the pairs studied.

The modernization of the rotary table design increases the efficiency of using CNC machines. Using the SolidWorks software product, topological optimization was carried out using additive technologies, which allows obtaining the final product without the need for additional processing. This reduces the mass of the part by 40–60% while maintaining all static characteristics, which allows saving on materials, reducing the time for production preparation and reducing the volume of mechanical processing.

The practical significance of the results obtained for mechanical engineering lies in: the creation of a methodology for selecting cutting modes for machine parts obtained by 3D-printing, in roughing and finishing operations; recommendations from the results of experimental studies of the wear value of friction pairs obtained by FDM-printing from ABS and COPET-plastic make it possible to determine the best friction pairs in terms of surface wear resistance; in the use of a modernized rotary table for milling work on CNC-machines, which increases the accuracy of machining the surface of the part; in the application of topological optimization using additive technologies in SolidWorks, which allows you to obtain the final product without the need for additional processing, which reduces the mass of the part from 40 to 60% while maintaining all static characteristics and allows you to save on materials, reduce the time for production preparation and reduce the amount of machining.

Keywords: quality of machine parts obtained by 3D-printing, accuracy, roughness, mathematical modeling, design.