

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**КУШНІРЧУК АНДРІЙ СЕРГІЙОВИЧ**

УДК 621.9

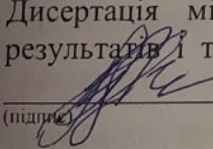
**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН,**  
**ОТРИМАНИХ З ПЛАСТМАС МЕТОДОМ 3D-ДРУКУ**

131 Прикладна механіка

13 Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

  
\_\_\_\_\_ А.С. Кушнірчук  
(підпис)

Науковий керівник :

**Ткачук Віталій Павлович**

кандидат технічних наук, доцент

Хмельницький – 2025

## 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, міцнісні 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, міцнісні 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°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 продукту 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. X 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 ATME-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.

The main results of the dissertation research have been published in 10 scientific papers. Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

*Articles in journals included in the list of professional publications of Ukraine:*

1. Karazey V. D., Sokolan K. S., Kushnirchuk A. S., Kalinin O. V. Modernization of a rotary table for a CNC machine. *Bulletin of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2021. № 6. P.141–146. *A rotary table for a CNC machine was modernized to increase the accuracy of machining surfaces of complex shape.*

2. Kushnirchuk A. S., Tkachuk V. P. Research on the influence of tool geometry and cutting modes on the accuracy of machining parts obtained by FDM printing. *Bulletin of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. №. 6. 2023. pp. 217–222. *The influence of tool geometry and cutting modes on the accuracy of machining parts obtained by FDM printing was studied.*

3. Kushnirchuk A. S., Tkachuk V. P. Analysis of the influence of cutting modes on the accuracy of the dimensions of the surfaces of parts manufactured by FDM printing, processed by turning and milling, taking into account their elastic deformations. *Bulletin of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. №. 3. 2024. pp. 451–460. *The construction of an analytical model of the surface machining process of plastic parts obtained by 3D-printing, in comparison with the process of cutting metals, taking into account the low elasticity of the material, has received further development.*

4. Kushnirchuk A. S. Optimization of the design of machine parts for effective additive manufacturing using SolidWorks Simulation. *Bulletin of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. № 6. 2024. pp. 497–502. *A methodology for optimizing the design of machine parts for effective additive manufacturing using SolidWorks Simulation is presented.*

5. Kushnirchuk A. S., Tkachuk V. P., Kharzhevsky V. O. Research on the strength characteristics of parts obtained using FDM printing from ABS and COPET plastic. Interuniversity collection of scientific papers (in the fields of knowledge "Physical and mathematical sciences" and "Technical sciences"). Lutsk. Issue 76. 2023 pp.147-152. *The results of the study of the strength characteristics of parts obtained using FDM printing from ABS and COPET plastic are presented.*

***Scientific works that confirm the approval of the dissertation materials.***

6. Kushnirchuk A. S. Additive technologies in foundry production. Comprehensive quality assurance of technological processes and systems, May 26–27, 2022. Chernihiv: Chernihiv Polytechnic National University 2022. Vol. 1. pp. 105–106. *Directions for the application of additive technologies in foundry production are indicated.*

7. Kushnirchuk A. S. Installation for testing the wear resistance of bodies obtained by FDM printing. The 9th International scientific and practical conference “Modern research in world science”, November 28-30, 2022. Lviv, Ukraine. 2022. pp. 506–509. *The design of the installation for testing the wear resistance of bodies obtained by FDM printing is described.*

8. Kushnirchuk A. S., Tkachuk V. P. Mechanical processing of parts obtained by FDM printing. X All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Higher Education Students and Young Scientists on Automatic Control Dedicated to the Day of the Rocket and Space Industry of Ukraine, April 12, 2023. Kherson-Khmelnytskyi: KhNTU, 2023. pp. 155–156. *The results of mechanical processing of parts obtained by FDM printing are presented.*

9. Kushnirchuk A. S. Analysis of geometric accuracy after mechanical processing of parts obtained by FDM printing. XIII International Scientific and Practical Conference, Chernihiv, May 25–26, 2023: in 2 vols.: National University "Chernihiv Polytechnic" NU "Chernihiv Polytechnic", 2023. T. 1. pp. 196–197. *The results of the analysis of geometric accuracy of surfaces after mechanical processing of parts obtained by FDM printing are presented.*

10. Kushnirchuk A. S., Tkachuk V. P. Milling of parts obtained by FDM printing. XII International Scientific and Technical Conference "Advanced Technologies in Mechanical Engineering ATME-2024", Ivano-Frankivsk - Yaremche, February 5-9, 2024. pp. 138–139. *The results of precision milling of parts after mechanical processing of parts obtained by FDM printing are presented.*

11. Kushnirchuk A. S., Analysis and selection of the strategy for finishing and rough machining of workpiece elements of complex geometric shape in SolidCAMthe. Materials of the XIV International Scientific and Practical Conference

«International forum: Problems and scientific solutions» (January 16-18, 2025; Melbourne, Australia). pp. 291-302 *Analysis and modeling of the strategy for finishing and roughing of workpiece elements of complex geometric shape in SolidCAM was carried out.*



## ЗМІСТ

АННОТАЦІЯ.....	2
ЗМІСТ.....	17
ВСТУП.....	21
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАСТОСУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ОТРИМАНИХ 3D- ДРУКОМ У ТЕХНОЛОГІЯХ І ТЕХНІЦІ.....	29
1.1 Аналіз існуючих технологій 3D-друку .....	29
1.2 Аналіз конструкцій обладнання для 3D-друку.....	33
1.3 Характеристика матеріалів 3D друку .....	37
1.4 Аналіз виникнення характерних дефектів основних параметрів поверхні деталей після 3D друку та пропозиції їх усунення.....	43
1.5 Існуючі технології механічного оброблення для покращення якості та точності поверхні деталей після 3D-друку .....	47
1.6 Аналіз впливу різних факторів на шорсткість поверхні та точність розмірів деталей, що оброблюються після 3D- друку .....	51
1.7 Вибір об'єкта досліджень.....	52
1.8 Висновки до розділу 1. Ціль і завдання досліджень.....	54
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПЛАСТМАС ОБТОЧУВАННЯМ ТА ФРЕЗЕРУВАННЯМ ПІСЛЯ 3D-ДРУКУ ТА ВІБІР ОПТИМАЛЬНОЇ СТРАТЕГІЇ ОБРОБЛЕННЯ ПОВЕРХОНЬ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК.....	57
2.1 Визначення основних фізичних факторів, що діють в зоні різання пластмас, отриманих 3D- друком та основні припущення.....	57
2.2 Побудова та аналіз аналітичної моделі процесу обточування з урахуванням пружних деформацій матеріалу деталі.....	61
2.2.1 Аналіз залежності сили різання $P_y$ при обточуванні від різних параметрів режимів різання .....	61

2.2.2 Аналіз залежності пружних деформацій поверхні пластикових заготовок від сили різання $P_u$ при обточуванні від різних параметрів режимів різання .....	65
2.3 Побудова та аналіз аналітичної моделі процесу фрезерування з урахуванням пружних деформацій матеріалу деталі.....	68
2.3.1 Аналіз залежності сили різання $P_v$ при фрезеруванні від різних параметрів режимів різання.....	69
2.3.2 Аналіз залежності пружних деформацій поверхні пластикових заготовок від сили різання $P_u$ при фрезеруванні від різних параметрів режимів різання.....	72
2.4 Особливості процесу фрезерування поверхонь заготовок з пластмас після 3D-руку на верстатах з ЧПК.....	75
2.5 Висновки до розділу 2.....	89
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА, МЕТОДИКА ТА УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	91
3.1 Програма проведення експериментальних досліджень.....	91
3.2 Характеристика та властивості матеріалів, отриманих FDM-друком із ABS та CoPET пластику.....	92
3.3 Верстатне обладнання для проведення процесів різання та його характеристики .....	93
3.4 Зразки та особливості методів механічного оброблення зразків, отриманих 3D-друком .....	95
3.5 Конструктивні особливості та вибір матеріалу різального інструменту для проведення експериментальних досліджень.....	98
3.6 Обладнання для дослідження характеристик міцності деталей, отриманих за допомогою FDM-друку із ABS та CoPET пластику .....	100
3.7 Установка для випробувань на зносостійкість.....	102
3.8 Прилади та обладнання для контролю розмірів та шорсткості поверхонь деталей.....	105

3.9	Методологія оптимізації конструкції деталей машин для ефективного адитивного виробництва за допомогою SolidWorks Simulation.....	108
3.10	Модернізація конструкції поворотного стола для розширення технологічних можливостей верстатів з ЧПК.....	109
3.11	Оброблення експериментальних даних та оцінка точності отриманих результатів.....	109
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ, ТОЧНОСТІ ТА ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ, ПАРАМЕТРІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВЕРСТАТНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ЧПК І МЕТОДОЛОГІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ОТРИМАНИХ 3D-ДРУКОМ.....		112
4.1	Дослідження впливу параметрів інструменту та режимів різання на точність оброблення деталей, отриманих FDM-друком .....	112
4.2	Дослідження параметрів точності та шорсткості для реальної деталі «Робоче колесо», виготовленої 3D-друком.....	120
4.3	Дослідження зношування пар тертя, отриманих за допомогою FDM- друку із ABS та CoPET пластику.....	123
4.4	Дослідження температурного впливу режимів різання на поверхню заготовки у процесі обточування.....	128
4.5	Дослідження характеристик міцності деталей отриманих за допомогою FDM-друку із ABS та CoPET пластику.....	128
4.6	Розширення технологічних можливостей оброблення деталей, отриманих за допомогою FDM-друку, та модернізація поворотного стола для верстата з ЧПК .....	131
4.7	Методологія оптимізації конструкції деталей машин для ефективного адитивного виробництва за допомогою SolidWorks Simulation.....	137
4.8	Висновки до розділу 4.....	145

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	148
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	152
Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	168
Додаток Б. Акти впровадження результатів роботи.....	170
Додаток С. Результати розрахунку сил різання при обточуванні та фрезеруванні.....	171

## ВСТУП

FDM-друк як найпоширеніший вид адитивного виробництва знайшов застосування в багатьох сферах: невисока вартість обладнання та витратних матеріалів зробила технологію доступною та поширеною. Велика різноманітність філаменту дозволяє виготовляти деталі з урахуванням експлуатаційних вимог до майбутнього виробу. Сучасні пластики дозволяють отримати такі властивості виробів: масло-бензостійкість, високий рівень діелектричності, стійкість до ультрафіолетового випромінювання, відсутність реакції з кислотами, стійкість при контакті з водою та ін.

Геометрична точність виробів, отриманих на 3D-принтерах, повністю залежить від типу механічної структури принтера, від коректної роботи елементів конструкції, рівня зносу рухомих частин, також важливу роль у формуванні точності виробу відіграє стабільна робота електроніки принтера, що повинна забезпечити відсутність пропуску кроків на крокових двигунах. Повністю справний, налаштований і відкалібрований принтер виготовляє вироби гарної якості, стабільних розмірів і з мінімальними відхиленнями від заданої 3D-моделі. Отримані деталі дозволяють відразу, без постоброблення, використовувати їх за призначенням, це можуть бути корпусні деталі, кронштейни, тримачі, заглушки і подібні вироби, що не мають відповідальних з'єднань, точних посадок та вимог щодо взаємного розташування поверхонь.

Одним з рішень проблеми покращення функціональності є механічне оброблення деталей, отриманих FDM-друком. Це може бути виконано за допомогою різноманітних інструментів та методів, включаючи токарне оброблення, фрезерне оброблення, шліфування та інші.

Одним з головних питань забезпечення якості деталей, отриманих FDM-друком, є забезпечення комплексного підходу до якості виробу, що включає в себе: точність відповідальних поверхонь згідно технічних вимог, необхідну шорсткість, міцносні характеристики матеріалу, дизайн форми з мінімізацією маси деталі. Механічне оброблення дозволяє значно підвищити точність

деталей, а також їх зовнішній вигляд. Зокрема, токарне оброблення або фрезерування може забезпечити високу якість поверхні деталі після FDM друку.

Вирішення науково-технічної задачі, а саме технологічного забезпечення якості деталей машин, отриманих 3D-друком, є актуальним науково-технічним завданням.

### ***Зв'язок роботи із науковими планами, програмами, темами***

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до державних і науково-технічних програм за пріоритетними напрямками розвитку науки та техніки України та відповідає положенням Закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» від 08.09. 2011р. № 3715-VI та Закону України «Про внесення змін до деяких законів України щодо пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки та інноваційної діяльності» від 13 січня 2024р. № 3534-IX, а також в рамках проведених науково-дослідних робіт кафедри технології машинобудування Хмельницького національного університету.

***Мета і завдання досліджень.*** Мета дисертаційної роботи полягає у розробленні технологічного забезпечення якості деталей машин, отриманих 3D-друком.

Досягнення поставленої мети можливе через розв'язання таких завдань:

- на основі аналізу особливостей методів 3D-друку, існуючого обладнання, аналізу властивостей матеріалу для 3D-друку сформулювати розуміння процесів в області досліджень і розробок для створення високоефективних технічних рішень;
- розробити фізичну модель процесу механічного оброблення заготовок отриманих FDM-друком з ABS та CoPET (PETg) пластику;
- побудувати математичні моделі процесів оброблення заготовок обточуванням та фрезеруванням, отриманих FDM-друком з ABS та CoPET (PETg) пластику;

- аналітично визначити залежність пластичних зворотних деформацій поверхні деталей, отриманих FDM-друком, в процесі механічного оброблення, застосувавши закон Гука для пласкої одиничної поверхні;
- сформуванати методику проведення експериментальних досліджень та розробити реєструючу апаратуру;
- дослідити вплив технологічних та конструктивних параметрів різального інструменту на точність та шорсткість поверхонь, отриманих FDM-друком, що оброблюються;
- визначити рекомендовані режими різання для оброблення, деталей отриманих за допомогою FDM-друку, при температурному режимі, що не призводить до порушення якості поверхні деталей;
- проаналізувати особливості процесу фрезерування пластмас після 3D-друку на верстатах з ЧПК;
- дослідити міцнісні характеристики деталей отриманих за допомогою FDM-друку із ABS та CoPET пластику;
- надати рекомендації по оптимізації конструкції деталей машин для ефективного адитивного виробництва за допомогою SolidWorks Simulation;
- спроектувати модернізоване оснащення для оброблення поверхонь з одного установа при фрезеруванні складних поверхонь на верстатах з ЧПК;
- сформуванати прикладну методологію призначення режимів різання та вибору різального інструменту при застосуванні верстатів з ЧПК і запропонувати практичні рекомендації розробнику.

**Об’єкт дослідження** – є процес завершального механічного оброблення поверхонь деталей отриманих 3D-друком з ABS та CoPET (PETg) пластику.

**Предмет дослідження** – 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, міцнісні характеристики матеріала, дизайн форми з мінімізацією маси деталі.

**Методи та засоби дослідження.** Теоретичні дослідження процесу різання заготовок, отриманих 3D-друком, проводились за допомогою математичного аналізу системи «інструмент – заготовка» на основі принципів теорії математичного моделювання із використанням обчислювальної техніки. В основі роботи лежать аналітичні та експериментальні методи дослідження. Дослідження проведено з використанням сучасних засобів руйнівного контролю; для визначення точності поверхонь використовувався сучасний вимірювальний прилад Мікрометр гладкий МКЦ 0-25. Шорсткість поверхні виробів, виготовлених за технологією швидкого прототипування, визначалася на основі стандартних методів, з використанням цифрового приладу Mahr MarSurf PS10. Оброблення результатів експериментальних досліджень виконана з використанням сучасного математичного апарату.

**Наукова новизна здобутих результатів** полягає в теоретичному та практичному обґрунтуванні раціональних режимів механічного оброблення деталей з пластмас, отриманих 3D-друком, та конструктивних параметрів різального інструменту.

В процесі виконання роботи отримані наступні наукові результати:

1. Отримав розвиток процес побудови математичної моделі різання обточуванням та фрезеруванням поверхонь деталей з пластмас, виготовлених 3D-друком, у порівнянні з процесом різання металів 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 зносу 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 низьку шорсткість відповідальних поверхонь деталей, отриманих 3D-друком при оптимальних температурах різання.

**Практичне значення отриманих результатів.** Практичне значення одержаних результатів для галузі машинобудування полягає у створенні методології вибору режимів на операції обточування та фрезерування поверхонь деталей для технологічного забезпечення якості деталей машин, отриманих 3D- друком.

Результати проведених досліджень реалізовані у методології процесу оптимальної стратегії оброблення її поверхонь та розробленню алгоритм розрахунку траєкторії руху інструмента, який враховує процеси, що протікають при утворенні поверхні деталі та застосовувати програмно-математичне забезпечення, що дозволить управляти процесом оброблення за заданим алгоритмом. Використання цих компонентів при проєктуванні керуючої програми дозволить компенсувати похибку, викликану пружними деформаціями і підвищити продуктивність оброблення. У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що величини зношування пар тертя, отриманих за допомогою FDM-друку із ABS та CoPET пластику, розрізняються по здатності до зношування поверхонь. 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.

Проведена модернізація конструкції поворотного стола підвищує ефективність застосування верстатів з ЧПК, особливо для малих підприємств та не призводить до значного здорожчання оснащення. Заміна ручного приводу

на кроковий двигун не тільки збільшує експлуатаційний ресурс поворотного стола, але й підвищує точність виконання робіт.

Для конструкторів та проєктантів рекомендована методологія топологічної оптимізації за допомогою генеративного дизайну, що дозволяє отримати кінцевий продукт без потреби в додатковій обробленні. 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.

Результати проведених досліджень та окремі положення прийнято до впровадження на підприємстві ПБКФ «Бджілка» (м. Хмельницький).

Теоретичні та прикладні результати, отримані в межах дисертаційного дослідження, впроваджені у навчальний процес кафедри технології машинобудування Хмельницького національного університету під час викладання дисципліни «Технологічні методи забезпечення якості виробів».

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати дисертаційної роботи, винесені на захист, є особистим здобутком автора. Постановка проблеми, формулювання дослідницьких завдань та аналіз отриманих результатів здійснені у співпраці з науковим керівником. Автору належать основні ідеї технологічних методів забезпечення якості виробів отриманих 3D-друком.

В одноосібній публікації [102] автору належить методологія оптимізації конструкції деталей машин для ефективного адитивного виробництва за допомогою SolidWorks Simulation.

У спільних публікаціях здобувачу належить: [117] – ідея модернізації поворотного стола для верстата з ЧПК для підвищення точності оброблення фрезеруванням поверхонь складної форми; [108] – проведення дослідження впливу геометрії інструменту та режимів різання на точність оброблення деталей отриманих FDM друком; [130] – побудова аналітичної моделі процесу оброблення обточуванням і фрезеруванням поверхонь деталей з пластмас, отриманих 3D-друком, у порівнянні з процесом різання металів з урахуванням

низької пружності матеріалу.; [102] – проведення аналізу методології оптимізації конструкції деталей машин для ефективного адитивного виробництва за допомогою SolidWorks Simulation; [116] – результати дослідження міцнісних характеристик деталей, отриманих за допомогою FDM друку із ABS та CoPet пластику; [131] – ідея розвитку напрямків застосування адитивних технологій в ливарному виробництві; [103] – розробка конструкції установки для дослідження на зносостійкість тіл отриманих FDM друком, опис її конструкції; [110] – результати механічного оброблення деталей, отриманих FDM друком; [111] – результати аналізу геометричної точності поверхонь після механічного оброблення деталей, отриманих FDM друком; [109] результати фрезерування деталей по точності після механічного оброблення деталей отриманих FDM друком, [101] проведено аналіз та моделювання стратегії чистового та чорнового оброблення елементів заготовок складної геометричної форми у SolidWorksCAM.

Розв’язання задач математичного характеру, обговорення результатів та формулювання висновків здійснювались у співпраці з науковим керівником.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи отримали позитивну оцінку та були представлені на:

- Міжнародній науково-технічній конференції *«Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*, м. Чернігів (26–27 травня 2022 р.);
- The 9th International scientific and practical conference *“Modern research in world science”*, Lviv. (November 28-30, 2022);
- X Всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених з автоматичного управління *присвячена Дню ракетно-космічної галузі України*, Херсон-Хмельницький. (12 квітня 2023 р.);
- XIII Міжнародній науково-практичній конференції, м. Чернігів, (25–26 травня 2023 р.);

– XII Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні технології у машинобудуванні ATME-2024», Івано-Франківськ-Яремче, (5-9 лютого 2024 р.).

– XIV International Scientific and Practical Conference «INTERNATIONAL FORUM: PROBLEMS AND SCIENTIFIC SOLUTIONS» Melbourne, Australia. (January 16-18, 2025).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 11 робіт, 5 статей у фахових виданнях, 6 матеріалів конференцій та тез доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, змісту, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи становить 175 сторінок друкованого тексту, з них анотація – на 15 стор., зміст – на 4 стор., основний текст – на 129 стор., список із 131 використаного джерела – на 14 стор., додатки – на 10 стор. Дисертація містить 81 рисунок та 18 таблиць.

## РОЗДІЛ 1

# АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАСТОСУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ОТРИМАНИХ 3D- ДРУКОМ У ТЕХНОЛОГІЯХ І ТЕХНІЦІ

### 1.1 Аналіз існуючих технологій 3D-друку

Адитивні технології (Additive Manufacturing, від слова «адитивність») полягають у пошаровому нарощуванні та формуванні об'єкта за допомогою комп'ютерних 3D-технологій. У сучасній промисловості це сукупність різних процесів, що дозволяють створювати 3D-об'єкти. Технологічний прогрес сприяє виробництву безлічі корисних речей для побуту, здоров'я та безпеки людини. Наприклад, у авіабудуванні адитивні технології дозволяють виготовляти більш економічні та легкі авіатранспорти, зберігаючи при цьому їх аеродинамічні характеристики. Адитивні технології є однією з форм виробничих технологій, де тривимірний об'єкт створюється шляхом поетапного накладання шарів матеріалу (друк, спікання). Для цього використовуються 3D-принтери, які здатні створити фізичний об'єкт з цифрової 3D-моделі, накладаючи пластичний матеріал по черзі [1-3]. 3D-друк активно застосовується в таких сферах, як медицина, освіта, машинобудування, авіація, харчова промисловість та інші [4]. Основними напрямками розвитку методів і технологій тривимірного друку є підвищення точності та швидкості виготовлення деталей, а також розширення асортименту використовуваних матеріалів, усунення дефектів друкованої продукції за допомогою механічного оброблення [6-8]. Автори [9-11] вказують на необхідність оброблення, коли функціональні потреби за вимогами до виробу не відповідають, наприклад, через низьку шорсткість поверхні або розмірну неточність. Такі неточності зумовлені низкою факторів, включаючи усадку, пружні деформації, кут прикладання (вертикальні стінки дуже близькі до номінального розміру, тоді як

повністю горизонтальні стінки відхиляються на кілька десятих міліметра), товщина шару, в'язкість середовища, похибка хорди, задирки.

Автори [5] вивчали, шорсткість та утворення задирок після механічного оброблення заготовок, виготовлених 3D-друком. Вони дійшли висновку, що для отримання більш гладкої поверхні потрібно використання меншої швидкості подачі та глибини різання разом із більшими обертами шпинделя.

Параметр шорсткості вважається ключовим фактором, що впливає на продуктивність компонентів машини. Це також фактор, який впливає на зародження втомних тріщин. Шорсткість поверхні включає в себе нерівності поверхні, викликані головним чином типом оброблення або процесом виготовлення заготовки. Щоб покращити геометричну точність і для досягнення необхідної якості деталей, поверхні піддаються додатковому механічному обробленню. Оброблюваність матеріалу CoPET залежить від виду процесу та механічних властивостей. Використання гібридної технології (3D друк у поєднанні з механічним обробленням) дозволило поєднати виробничі процеси. 3D-друк забезпечив короткий час вироблення та мінімізував відходи, а під час оброблення компенсуються недосконалості та відмінності розмірів. Поєднання двох процесів забезпечило більшу універсальність і ширший діапазон можливостей [12, 13,21].

Основними напрямками розвитку сучасного машинобудування є: впровадження нових полімерних, композиційних та інтелектуальних матеріалів у процес виробництва деталей машин; розробка нових технологічних методів, обладнання та виробничих процесів для машинобудівних виробів. Першим етапом створення машини є просторове проектування деталей машин з використанням комп'ютерних віртуальних тривимірних моделей, що стало можливим завдяки застосуванню сучасного програмного забезпечення (CAD-системи), а також моделюванню та розрахункам (CAE) [14-17]. Впровадження технологій «тривимірного друку» (3D-друк) дозволяє створювати деталі машин або готові вироби на основі розробленої 3D-моделі в найкоротші строки і з мінімальними втратами матеріалу [18].

У цьому контексті традиційні машинобудівні технології, засновані на механічному обробленні заготовки, в яких частина матеріалу видаляється (обточування, фрезерування), є менш ефективними. Основними перевагами адитивних технологій у порівнянні з традиційними є:

- зменшення трудомісткості виготовлення;
- скорочення термінів проектування та виготовлення деталей;
- зниження собівартості проектування та виготовлення;
- економія матеріалів для машинобудування.

На сьогодні існує безліч методів 3D-друку, які використовують різні матеріали, але всі вони ґрунтуються на принципі пошарового формування матеріального об'єкта. Для створення шарів застосовуються такі технології:

Лазерна технологія, зокрема лазерна стереолітографія (Laser stereolithography, SLA), при якій об'єкт формується з рідкого фотополімеру, що твердіє під впливом ультрафіолетового лазерного випромінювання [19]. Тривимірний об'єкт створюється шар за шаром шляхом занурення рухомої платформи в ємність з матеріалом. Після завершення процесу модель промивається і витримується під ультрафіолетовою лампою, внаслідок чого рідкий полімер перетворюється на міцний пластик [20].

Технологія SGC відрізняється способом засвітлення (Випромінювання через фотошаблон) Сучасні SGC-принтери використовують DLP-матриці. Роздільна здатність цієї технології поступається SLA і становить всього 0,1 мм, однак і вартість таких принтерів помітно нижча.

PolyJet схожа на струменевий друк, але замість струминної подачі чорнила на папір 3D-принтери випускають струмені рідкого фотополімеру, який утворює шари на модельному лотку. За цією технологією нанесення шару здійснюється не зануренням у ванну, а розпорошенням матеріалу на поверхню. Шар полімеру засвічується ультрафіолетом, після чого процес повторюється. [23] Для друку за цією технологією необхідно використовувати матеріал підтримки (зазвичай гелеподібний розчинний у воді полімер). Дана технологія дозволяє використовувати відразу кілька матеріалів, що відрізняються

кольором, різними значеннями твердості, створюючи таким чином багатокомпонентні моделі.

Селективне лазерне спікання (Selective laser sintering, SLS), процес при якому фізичний об'єкт, що відтворюється, формується з порошкового матеріалу (пластик, метал) шляхом його плавлення під дією випромінювання лазера. Температура робочої камери зазвичай має підтримуватись на рівні трохи нижче точки плавлення матеріалу, а для запобігання окисленню процес виконується середовищі без кисню.

Електронно-променева плавка аналогічна технології SLS, відмінною особливістю є те, що майбутній об'єкт формується плавленням матеріалу (металевого порошку) завдяки електронному випромінюванню у вакуумі.

Ламінування (laminated object manufacturing, LOM), при якому об'єкт формується пошаровим склеюванням плівок матеріалу з використанням активних процесів нагрівання, тиску та подальшим вирізанням лазером або різальним інструментом на кожному шарі відповідних контурів перерізів майбутнього виробу. У деяких випадках видалення зайвого матеріалу викликає труднощі;

Склеювання або спікання порошкоподібного матеріалу, яке схоже на лазерне спікання. Відмінність полягає в тому, що порошкова основа (у більшості випадків – целюлоза) склеюється речовиною, що надходить із друкуючої головки. При цьому можливе фарбування об'єкта, що відтворюється з використанням речовин різних кольорів;

Наплавлення (FDM) – при якому майбутній об'єкт формується укладанням шарів розплавленої нитки (філаменту) з плавкого матеріалу, наприклад, пластику, металу, воску [24].

В окрему групу можна виділити технології, що використовують біопринтери, які дозволяють здійснювати «друк» 3D-структури органу для пересадки стовбуровими клітинами, подальший поділ, зростання та модифікації клітин забезпечують остаточне формування органу, що «вирощується» [25-27,22].



## 1.2 Аналіз конструкцій обладнання для 3D – друку

Сьогодні існує чимало різновидів процесів виготовлення за допомогою адитивних технологій, однак усі вони мають спільну рису — створення прототипу відбувається шляхом послідовного накладання шарів композитного матеріалу [28]. Основна перевага адитивних технологій полягає в можливості виготовлення прототипу за один етап, використовуючи лише вихідні геометричні дані моделі деталі [29]. Це усуває потребу в попередньому плануванні технологічних операцій, спеціалізованому обладнанні для обробки матеріалів, транспортуванні між верстатами тощо.

Водночас, у порівнянні з обробкою на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК), адитивні технології мають певне обмеження — вузький вибір матеріалів для друку.

Загалом процеси 3D-друку включають три основні етапи: створення поперечних перерізів об'єкта, пошарове накладення цих перерізів і об'єднання шарів у єдину структуру. Завдяки такому підходу для побудови фізичного об'єкта достатньо лише інформації про його поперечні зрізи, що дозволяє уникнути багатьох труднощів, характерних для традиційних методів виробництва.

На рис. 1.1 показано схему етапів виготовлення прототипу.

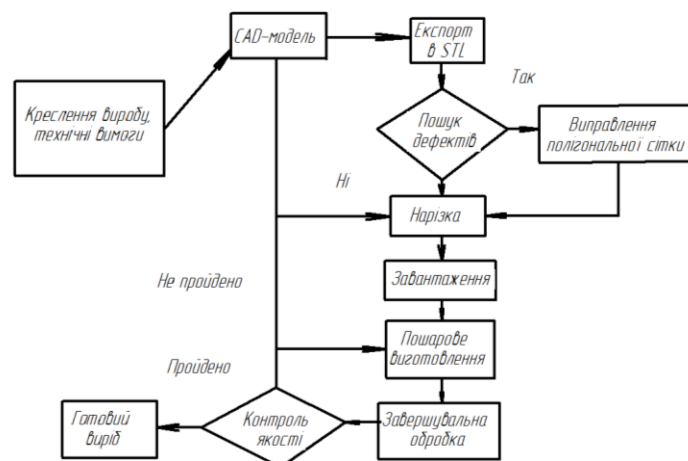


Рис. 1.1 Блок-схема виготовлення прототипу

Виріб або «модель» формується екструзією матеріалу (філаменту) з укладанням послідовних шарів, що затвердівають одразу після екструдювання, завдяки активному охолодженню.

Пластикова нитка подається з котушки та розплавляється в екструдері — пристрої, оснащеному механічною системою подачі, нагрівальним елементом для плавлення матеріалу та соплом, через яке відбувається безпосередня екструзія. Нагрівальний елемент забезпечує нагрів сопла, яке, у свою чергу, плавить пластикову нитку та подає розплавлений матеріал на формовану модель. Як правило, верхня частина сопла охолоджується вентилятором для створення необхідного температурного градієнта, що забезпечує стабільність та рівномірність подачі матеріалу.

Діаметр сопла може варіюватися від мікрометрів до сантиметрів, і добирається відповідно до конструктивних особливостей екструдера та вимог до точності виготовлення моделі. Переміщення екструдера в горизонтальній та вертикальній площинах здійснюється відповідно до заданої траєкторії, сформованої системою автоматизованого проєктування (рис. 1.2), під управлінням алгоритмів, аналогічних тим, що використовуються у верстатах з числовим програмним керуванням. Побудова моделі відбувається пошарово, знизу догори.

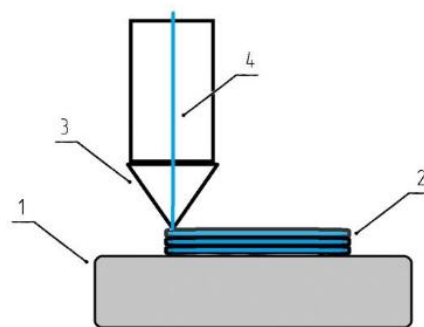


Рис. 1.2. Схема процесу виготовлення виробу методом шарового наплавлення (FDM): 1 – платформа з нагрівом; 2 – виріб у процесі друку; 3 – екструдер; 4 – пластикова нитка

Зазвичай екструдер (або «друкувальна головка») приводиться в рух за допомогою крокових двигунів або сервоприводів. Найпоширенішою координатною системою, що використовується в технології FDM, є декартова система, яка базується на тривимірному просторі з осями X, Y та Z.

FDM-технологія вирізняється високою гнучкістю застосування, проте має і певні обмеження. Так, створення нависаючих елементів конструкції можливе лише при незначних кутах нахилу. У випадках, коли ці кути є великими, виникає необхідність у використанні допоміжних опорних структур, які формуються безпосередньо під час друку і видаляються після завершення виготовлення моделі. За останні кілька років були зроблені машини FDM, які можуть виготовляти вироби з високою точністю та меншою похибкою [30]. 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 [31].

Існує кілька основних варіантів позиціонування друкувальної головки в 3D-принтерах:

- **Декартова система:** передбачає наявність трьох взаємно перпендикулярних напрямних, вздовж яких переміщується або друкувальна головка, або платформа з моделлю.

- **Автономна система:** друкувальна головка встановлена на окремому шасі, що самостійно пересувається в просторі завдяки вбудованому приводу.

- **Ручна система:** друкувальний пристрій реалізовано у вигляді 3D-ручки або олівця. Користувач самостійно переміщує пристрій у просторі, додаючи матеріал у потрібне місце. Матеріал, який подається через наконечник, швидко застигає. Цей варіант умовно відносять до 3D-друку. Існують різні типи 3D-ручок: одні працюють на термополімері, який твердне при охолодженні, інші — на фотополімері, що затвердіває під впливом ультрафіолетового випромінювання.

Створення 3D-моделей зазвичай здійснюється за допомогою CAD-систем, які підтримують функції керування 3D-друком. Для передачі моделей на

принтер використовується файл у форматі STL. Більшість сучасних 3D-принтерів оснащені власним програмним забезпеченням — як комерційним, так і з відкритим вихідним кодом [32,33].

Найпоширеніший клас принтерів (напівпрофесійних/аматорських) для технології моделювання плавленого осадження (FDM), застосовується торговою маркою Stratasys Ltd, в якому розплавлений пластик (переважно ABS і PLA) [34] екструдується через сопло, що утворює структури, які складаються з тонких трубок, у великий пластиковий виріб. Цей прийом також відомий під терміном виготовлення плавлених ниток (FFF). Однією з проблем 3D-друку є крок перетворення креслення-моделі в код, який може виконуватися самим принтером. Цей крок називається нарізкою через слайсер.

Однією з проблем 3D-друку [35] є те, що друкований матеріал, як пластик, так і метал, має шорстку поверхню, а також вкраплення, для яких згодом необхідне оброблення операціями різання.

Таким чином, нові машини, які зараз з'являються на ринку є гібридні верстати з ЧПК [36], такий верстат з ЧПК (рис. 1.3) має дуже високу точність, але й досить високу ціну.



Рис. 1.3. Гібрид LASERTEC 65 DED

Автори [37] розробили гібридний процес поєднання процесу SLM і фрезерування з ЧПУ. Вони стверджують, що після порівняння з попередніми дослідженнями шорсткість поверхні відфрезерованих зразків зменшилася до 23% у порівнянні із 40% для необроблених зразків. Запропонували гібридне

постоброблення для покращення якості поверхні металевих деталей [37]. Автори використовували комбіновану кавітацію та електрохімічний метод розчинення для фінішного оброблення металевих деталей із нержавіючої сталі 316 L. Вони зробили висновок, що максимальну шорсткість поверхні покращено з 9,952 до 3,579 мкм. Автори [38] досліджували вплив оброблення на шорсткість поверхні і ефекти постоброблення. Крім того, вони також досліджували синергетичний вплив шорсткості поверхні на втому оброблених частин виробу. Автори [39] експериментально досліджено сумісну дію тепла і хімічне оброблення наночастинками для оброблення FDM-друку. Результати показали значне покращення шорсткості поверхні та твердості за допомогою цього гібридного методу оброблення поверхонь FDM-деталей.

### **1.3 Характеристика матеріалів для 3D – друку**

Як витратні матеріали в 3D-друці використовуються різноманітні термопластики та композитні матеріали, серед яких — ABS, PLA, CoPET, полікарбонати, поліаміди, полістирол, лігнін та інші. Кожен з них забезпечує різний баланс між механічною міцністю та температурною стійкістю, що дозволяє підібрати оптимальний матеріал залежно від потреб виробництва [40].

До найбільш поширених матеріалів належать ABS, CoPET, PLA, поліфенілсульфон, полікарбонат і поліефірід, які цінуються за високу термостійкість. Окремі типи поліефіриду відзначаються також підвищеною вогнетривкістю, що робить їх придатними для використання в умовах підвищених температур і пожежної безпеки.

Розглянемо основні витратні матеріали, які використовуються у роботі з 3D-принтерами та мають застосування, потенційне чи фактичне.

1. ABS (акрилонітрилбутадієнстирол) – пластик є одним з найпопулярніших в світі матеріалів для 3D-друку, тому що він досить міцний і ним відносно легко друкувати [41]. Він може бути використаний для виготовлення функціональних 3D-друкованих деталей і для прототипів.

Користувачі [42] виявили, що видиму ступінчастість шарів, утворену при 3D-друку ABS пластиком, можна істотно зменшити, впливаючи на готову деталь парами ацетону [43]. Цей метод дозволяє користувачам отримувати гладкі глянцеві прототипи. Температура склування (температура, при якій пластик починає розм'якшуватися) ABS становить 105°C. Тому при розробці прототипу деталі необхідно враховувати температуру експлуатації готового виробу. Якщо деталь буде використовуватися при температурі більше 105°C, ABS пластик буде розм'якшуватися і деформуватися. Усадка ABS пластику може привести до розтріскування або розщепленню шарів, у міру збільшення висоти об'єкта. Саме з цієї причини обов'язковою умовою є наявність платформи з підігрівом. Також бажано, щоб у приміщенні підтримувалася постійна температура і не було протягів, які можуть прискорити охолодження, а, отже, і деформацію матеріалу. Переваги: ABS – міцний і довговічний матеріал. Володіє хорошою стійкістю до нагрівання та ударів. Матеріал буде жолобитися і гнутися перед тим, як зламатися, довговічність ABS також сприяє його використанню для функціональних деталей. Механічні властивості, найбільш важливими з яких є міцність матеріалу і міцність до ударів, залежать в основному від температури експлуатації. Також полімеру властива чудова стабільність під обмеженим навантаженням. Це термопластичний, жорсткий, легкообробний пластик, що має підвищену ударну міцність.

Підходить для таких робіт, як фрезерування, свердління, токарне оброблення і т.п. Щільність різних модифікацій варіює від 0,25 до 0,68 г/см<sup>2</sup>. За допомогою модифікацій полімеру можна підвищити його теплостійкість, міцність, і т.п.

Недоліки: ABS дуже чутливий до змін температури, тому рекомендується застосовувати принтери із столом з підігрівом, а також закритим корпусом. Коливання температури можуть призвести до деформації та появі тріщин на деталях. Закритий корпус допоможе підтримувати задану температуру під час друку. Ще один недолік ABS – його чутливість до ультрафіолетового випромінювання (УФ). Внаслідок надмірного впливу УФ ABS стає крихким,

що істотно знижує його міцність і довговічність. Так що краще не використовувати ABS для зовнішніх робіт.

## 2. Поліпропілен.

Є полімером, який отримують з нафтопродуктів або газів крекінг-процесів нафти. Випускається у вигляді гранул або ниток. Є термопластичним, може зберігати кристалічну структуру та високу механічну міцність практично до температури плавлення (від 160 до 170°C).

Має наступні переваги: стабільність форми при нагріванні, висока механічна міцність, висока хімічна стійкість (стійкість до агресивних середовищ), придатність для переробки будь-якими способами, відсутність токсичності, низька вартість, вологостійкість.

До недоліків можна віднести: недостатню морозостійкість (при -5°C стає крихким), схильність до старіння під дією ультрафіолетових променів або кисню (погіршення фізико-механічних властивостей, розтріскування, «крейдування»).

З нього виготовляють ротори центрифуг, корпуси насосів, зубчасті колеса, профілі та листи конструкційного призначення, деталі машин, рукоятки, штапельні та декоративні тканини, пакувальні плівки, суднові канати, рибальські сіті, труби, резервуари, судини. У 3D-друку поліпропілен використовується рідше, ніж ABS-пластик, через високу усадку (у 3,5 рази більше, ніж у ABS-пластику). Подібні недоліки можуть призвести до істотних деформацій моделі, що роздруковується. Також цей матеріал рекомендується застосовувати тільки за наявності платформи, що нагрівається, через адгезійні властивості поліпропілену (відлипання від холодної області друку).

## 3. Поліетилен низького тиску.

Поліетилен є продуктом полімеризації газу етилену, одержуваного при крекінг-процесі нафти. Випускається як гранули або порошок. Є головним представником групи поліолефінів. Це високомолекулярний карбоцепний полімер етилену (високомолекулярний парафін), що має комплекс цінних технічних властивостей. Поліетилен широко використовується у техніці.

Залежно від способу виробництва його поділяють на поліетилен високого тиску (ПЕВС), середнього (ПЕСР) та низького (ПЕНД). Останній можна застосовувати у 3D-друку. Поліетилен низького тиску є термопластичним полімером із високою еластичністю, гнучкістю і в'язкістю. Є гарним діелектриком та фізіологічно нешкідливим матеріалом. Не схильний до втрати своїх властивостей навіть при температурі  $-17^{\circ}\text{C}$ . Температура плавлення коливається від  $130$  до  $145^{\circ}\text{C}$ , а застигання – від  $100$  до  $120^{\circ}\text{C}$ .

Має наступні переваги: високу стійкість до агресивних середовищ (солів, лугів, кислот), високу електричну міцність, низьке вологопоглинання, високу ударостійкість, жорсткість, нетоксичність, низьку діелектричну проникність, задовільну механічну міцність, хорошу стійкість до стирання, можливість переробки будь-якими методами.

До недоліків слід віднести: низьку теплостійкість під навантаженням, плинність при підвищеній температурі, високий коефіцієнт теоретичного розширення, схильність до старіння під дією ультрафіолетових променів, недостатню морозостійкість, підвищену усадку при затвердінні; при температурі понад  $120^{\circ}\text{C}$  виділяє токсичні речовини.

Застосовують при виготовленні загальнотехнічних, конструкційних, антикорозійних, електроізоляційних та радіотехнічних виробів, таких як крани, вентилі, золотники, шестерні, крапельниці та ілюмінатори, арматури.

Незважаючи на те, що матеріал є цілком дешевим, у 3D-друці його використовують відносно рідко. Причиною цього є усадка і низька адгезія, що проявляється в поганому зчепленні наступного шару матеріалу з попереднім, яке може призвести до деформацій, розтріскування і розшаровування моделі.

#### 4. Полікарбонат.

Являє собою термопластичний полімер, що має високу міцність і прозорість. Належить до класу синтетичних полімерів. Це лінійний полієфір вугільної кислоти та двоатомних фенолів. Має високу теплостійкість (до  $153^{\circ}\text{C}$ ). Зберігає свої властивості у широкому діапазоні температур (від  $-40$  до  $120^{\circ}\text{C}$ ).



Виробництво полікарбонату має екологічно небезпечні властивості, але сам полікарбонат біологічно інертний.

Він не має аналогів серед полімерних матеріалів за механічними властивостями. У ньому знайшли своє поєднання такі властивості, як висока прозорість, унікальна ударостійкість та висока термостійкість. Властивості полікарбонату практично не залежать від температурних змін, а критичні температури, за яких даний матеріал стає крихким, знаходяться за межами можливих негативних температур експлуатації.

Має наступні переваги: тепло- і атмосферостійкість, високу ударну в'язкість, високу стійкість до повзучості під навантаженням, стабільні електричні характеристики в широкому інтервалі температур і частот, пластичність в широкому інтервалі температур, високі електроізоляційні властивості, стійкість до дії більшості кислот при високих температурах, низьке водопоглинання, відсутність займання, мала усадка при литті.

Недоліки: при тривалому кип'ятінні у воді проявляється крихкість, руйнується під дією їдких лугів та аміаку, розчиняється у хлорованих вуглеводнях, ефірах та кетонах.

Застосовується при виготовленні трубопровідної апаратури, клапанів, фільтрів, шестерень, сепараторів, вкладишів і навіть конструкційних елементів, які експлуатуються у жорстких умовах теплових, механічних і динамічних навантажень.

#### 5. Поліфенілсульфон, полілактрид, фотополімерні смоли.

Дані матеріали знайшли широке застосування в середовищі 3D-друку і мають великий потенціал впровадження в галузі важкої промисловості [44]. Поліфенілсульфон є аморфним термопластиком з хорошими діелектричними, механічними і тепловими властивостями. Температура плавлення знаходиться у проміжку від 340 до 370°C. Цей матеріал дуже міцний і практично не горить, тому його широко використовують в аерокосмічній та авіаційній галузях при виробництві різних теплостійких деталей.

Переваги: високі діелектричні властивості, фізіологічна інертність, висока стійкість до ударів, висока максимальна температура роботи (скловання – від 220 до 230°C), хороша хімічна стійкість до лугів, кислот і розчинників.

Недоліки: виділення шкідливих речовин при дії відкритого полум'я, можливість розтріскування при механічному обробленні, ускладнене полірування після друку через високу міцність матеріалу.

Полілактрид є найбільш екологічно та біологічно сумісним матеріалом серед усіх матеріалів 3D-друкарського виробництва. Це термопластичний поліефір, який виробляється з відходів різних поновлюваних біомас. За фізико-механічними характеристиками схожий на всі перераховані вище матеріали. Поставляється як нитки. Температура плавлення знаходиться в межах 170°C.

Використовується для виробів з обмеженим терміном служби. Переваги: отримання більш детальних та повністю готових об'єктів, гладка поверхня, нетоксичність, відмінне ковзання деталей, суттєва економія енергії через низьку температуру розм'якшення нитки. Недоліки: висока ціна виробництва сировини, моделі недовговічні та розкладаються у природних умовах.

Фотополімерні смоли є окремим класом світлочутливих смол, які мають здатність до зміни свого агрегатного стану за допомогою впливу ультрафіолетового спалаху або лазерного променя. Фізико-механічні властивості різноманітні і залежить від кінцевого призначення продукту.

Позитивні якості: широкий діапазон фізико-механічних властивостей, немає необхідності в обробленні поверхні після друку, висока роздільна здатність друку (до 0,025 мм).

Недоліки: великогабаритність обладнання, складність друку, дорожнеча матеріалів.

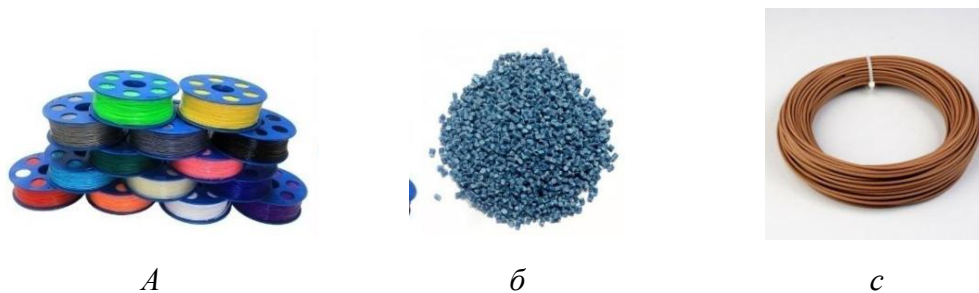


Рис. 1 4. Вигляд матеріалів для 3D-друку: *а* – ABS-пластик;  
*б* – поліпропілен; *с* – полімер на основі деревини

Бурхливий розвиток 3D-друку призвів до не менш бурхливого розвитку витратних (робочих) матеріалів для друку, переважно пластмас.

Ця обставина пов'язана з тим, що саме пластмаси виявилися найбільш придатними для технологій FDM (моделювання методом наплавлення) та SLS (селективного лазерного спікання). Як показує огляд, найбільш затребуваними видами пластмас для 3D-друку є ABS- і PLA-пластики. Так, ABS-пластик коштує приблизно вдвічі дешевше свого головного конкурента – PLA-пластика. PLA-пластик відноситься до категорії біорозкладних пластмас, оскільки основними ресурсами для його виробництва є кукурудза та цукрова тростина. Нетоксичність полілактиду є основною перевагою даного матеріалу.

У порівнянні з ABS-пластиком, він має нижчу температуру плавлення (порядку 190°C), відповідно процес друку з його використанням менш енерговитратний.

#### **1.4 Аналіз виникнення характерних дефектів основних параметрів поверхні деталей після 3D- друку та пропозиції їх усунення**

Процес друку FDM може застосовувати кілька різних матеріалів, в основному це термопласти акрилонітрилбутадієнстирол (ABS) і полімолочна кислота (PLA), і високотемпературні термопласти, такі як ULTEM (полієфірімід) 9085-смола. Тим не менш, температура під час виробництва

призводить до розшарування і спостерігається підвищена величина шорсткості на виготовлених об'єктах.

На рис.1.5 та рис. 1.6 наведено дефекти поверхні виробу, отриманого FDM-друком, від різних факторів. Негативно позначається ефект сходів на поверхні прототипів FDM із вигнутою або похилою поверхнею. Одним із недоліків процесу згладжування є отримання кінцевого продукту з погіршеними якісними характеристиками.

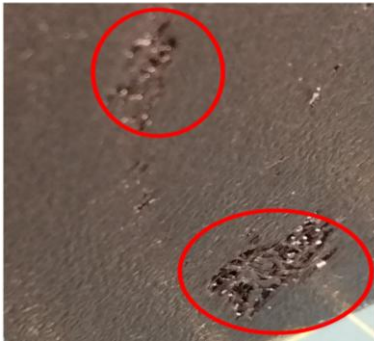


Рис. 1.5. Дефекти на нижній поверхні деталі (від столу) внаслідок поганої адгезії першого шару

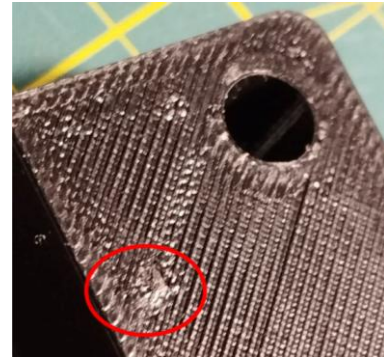


Рис. 1.6. Дефект друку на горизонтальних поверхнях

Як результат необхідна додаткове оброблення надрукованого виробу, це у свою чергу, позначається на механічних характеристиках виробу, що є критично важливим для забезпечення його здатності витримувати задані деформації або критичні навантаження без втрати цілісності чи виходу з ладу, якщо він використовується протягом тривалого часу. Механічні властивості друкованої частини можуть бути підвищені за допомогою різноманітних покращень апаратури друку та методів постоброблення [44-46].

У результаті механічні характеристики оригінальних компонентів і частин після постоброблення можуть відрізнятися.

Хоча вищезазначені недоліки, такі як шорстка поверхня, вкраплення та ін., виникають під час друку, їх можна усунути різними методами [47-50] і, в результаті усунення або зменшення цих дефектів, вироби відповідатимуть за розмірами та якісними характеристиками. Фрезерування та обточування

деталей після 3D-друку виступають як додаткові етапи механічної обробки, спрямовані на поліпшення якості поверхні або досягнення заданих експлуатаційних характеристик. Якість обробленої поверхні залежить від низки чинників, зокрема початкової якості друку методом FDM, властивостей використаного матеріалу, параметрів механічної обробки та технічного стану обладнання [51–53].

У роботах А. І. Грабченко [54] наголошується, що точність виробу, яку можна отримати, лежить у межах від 0,1 до 0,3 мм. Точність виготовлених за методом FDM виробів залежить від кількох чинників: калібрування установки (3D-принтера), кваліфікації обслуговуючого персоналу, розташування виробів на робочій платформі установки.

Конструкційний матеріал, що застосовується за методом пошарового наплавлення, – це в основному різні термопластики: ABS-пластик, CoPET-пластик, але можливе застосування полікарбонату, PLA, нейлону і т.п.

При необхідності для зміцнення нависаючих елементів деталі, які не контактують з робочою платформою, використовують підтримуючі конструкції (найчастіше деревоподібні) з HIPS-пластику, який легко видаляється за допомогою розчинника.

Основним недоліком цього методу є низька міцність готового виробу [55]. Вся справа в залишкових термічних напругах, які викликають подальшу деформацію та усадку виробу.

На поверхнях виробу можуть виникати характерні дефекти (напливи), які потім можна видалити наступним механічним обробленням, наприклад, на токарному верстаті, фрезерному верстаті або шліфувальним папером.

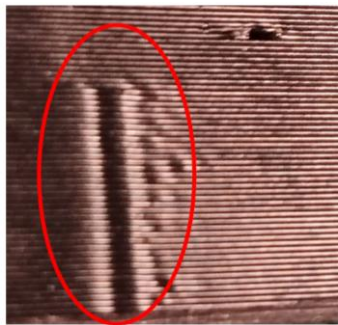


Рис. 1.7. Дефекти на вертикальних поверхнях деталі («шов») внаслідок переходу друкуючої головки на наступний шар



Рис. 1.8. Дефекти на вертикальних поверхнях деталі внаслідок забрудненого сопла

Є можливість паралельного виготовлення кількох деталей, якщо вони вписуються в робочу зону установки, але звідси впливає ще один недолік друку за методом FDM: при переміщенні від одного об'єкта до іншого екструдер тягне нитку, що призводить до зниження якості виробу.

Також, щоб уникнути затвердіння матеріалу, сопла екструдера повинні підтримувати постійну температуру плавлення модельного матеріалу. При дослідженні було виявлено, що якість поверхні надрукованих частин може бути незадовільною через ефект сходів, а також такі параметри, як повітряні проміжки між елементами, ширина шару або використовуваний шаблон заповнення.

Параметр шорсткості вважається ключовим фактором, що впливає на продуктивність компонентів машини.

Шорсткість поверхні включає в себе нерівності поверхні, викликані головним чином типом оброблення або процесом виготовлення заготовки. [56-58].

Якщо температура склування CoPET становить  $75^{\circ}\text{C}$ , то рекомендовані: швидкість різання 30 м/хв, глибина обточування  $0,5 \div 1$  мм, швидкість подачі  $0,05 \div 0,22$  мм/об, щоб запобігти надмірному нагріванню заготовки. Однією з

проблем при обробленні цих матеріалів є зливна стружка, намотана навколо заготовки.

Виробництво компонентів машин і обладнання, які працюють в парі, все більше досягається за допомогою технології 3D-друку, що спонукає до необхідності отримувати вироби в задовільному стані по зносу, довговічності та економічності.

Інтеграція різних технологій виробництва, включаючи 3D-друк і класичне механічне оброблення, є одним із принципів стратегії Industry 4.0. Комбінування цих видів дозволяє підвищити якість виробів у виробничому процесі. А також застосовувати у виробництві інтегровану автоматизовану систему контролю якості 3D-принтера. З іншого боку, широке впровадження адитивного виробництва у промисловості стикається зі значними обмеженнями, пов'язаними з досяжною якістю виробництва. Одним потенційним рішенням є використання гібридних методів виробництва, які включають додаткові процеси, такі як механічне оброблення [59-66].

Використання гібридних методів забезпечує більшу гнучкість дизайну та інтеграцію виробничих процесів, в даному випадку 3D-друк і механічне оброблення. 3D-друк дозволяє швидке виробництво, мінімізація відходів і широкий вибір матеріалів. Оброблення на верстатах компенсує недоліки та коливання розмірів. Поєднання цих двох методів забезпечує більшу універсальність і розширені можливості.

### **1.5 Існуючі технології механічного оброблення для покращення якості та точності поверхні деталей після 3D друку**

Відомі технології [67-75] та рекомендовані режими різання для порізки та механічного оброблення пластмас та склопластиків, які застосовуються у створенні різноманітних виробів з листового матеріалу та круглих заготовок.

Характеристики оброблення пластмас обточуванням та фрезеруванням дуже схожі на характеристики оброблення металів. Однак їх структура і склад

накладають додаткові особливості. Через відносно низьку щільність, міцність і твердість пластмас опір стисненню і зсуву при різанні низький, а сили різання набагато менші, ніж при обробленні металів. Це дозволяє використовувати більш високі режими різання для оброблення пластмас. При різанні термопластів у більшості випадків утворюється суцільна стружка, в той час як при різанні реакційноздатних пластмас утворюється подрібнена стружка, яка легко розлітається. При різанні пластмас на поверхнях тертя інструменту виникають відносно високі температури (до 500°C), що призводить до прилипання інструменту до заготовки. Це пов'язано з тим, що теплопровідність пластмас у кілька разів нижча, ніж у металів. Після оброблення в поверхневому шарі деталі виникають залишкові напруження, які в поєднанні з напруженнями під час складання (наприклад, затягування болтів і гвинтів) часто призводять до появи невеликих поверхневих тріщин. Для зменшення залишкових напружень при обробленні термопластів використовуються різні технічні методи: стиснення матеріалу в зоні свердління, бічне фрезерування, багатоопераційне свердління з мінімальним прихватом на останньому проході і, у випадку з термопластами, помірне нагрівання.

Термопласти обробляються при глибинах різання від 1 до 7 мм, подачах від 0,05 до 0,8 мм/зуб і швидкостях від 100 до 500 м/хв, в залежності від марки і типу оброблення (чорнова, чистова).

Якість оброблення забезпечується використанням добре загостреного інструменту. Для підвищення якості оброблення використовуються алмазні інструменти. Точність оброблення термопластів і термореактивних матеріалів визначається методом оброблення. Шорсткість поверхні залежить насамперед від матеріалу, що обробляється для реактопластів  $R_a$  від 10 до 2,5 мкм; для термопластів  $R_a$  від 2,5 до 0,63 мкм; для фрезерування реактопластів  $R_a$  від 5 до 1,25 мкм; для термопластів  $R_a$  від 5 до 0,63 мкм. .

Сили різання при обробленні пластмас дуже малі. Наприклад, при обточуванні термопластів (фторопласт-4) сила  $P_z$  коливається в межах від 2 до



50 Н, а при обточуванні реактопластів (склотекстоліт СТ) – в межах від 5 до 250 Н.

Невеликі значення сил – це перша закономірність під час різання пластмас. Інша закономірність полягає в тому, що більшу частку сил  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$  складають сили, що діють на задній поверхні інструментів. Автором [76] встановлено, що при обточуванні склотекстоліту СТ сили, що діють на задніх поверхнях різців, становлять від 70 до 95 % значень сил  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$ , а при різанні загостреним інструментом перевищують силу  $P_y$  всього від 10 до 20%, а при зносі інструменту від 0,12 до 0,18 мм сила  $P_y$  стає більше сили  $P_z$  і при подальшому зношуванні інструменту перевищує її від 1,25 до 1,5 разів. При різанні реактопластів спостерігається велике коливання абсолютних значень сил, пов'язане з переривчастим характером процесу стружкоутворення. Наприклад, при точенні того ж склотекстоліту СТ коливання всіх складових сил доходить від 60 до 80 % їх абсолютних значень із частотою від 5 до 20 разів на секунду.

У пешу чергу слід підкреслити ще одну особливість сил під час різання пластмас. Якщо при різанні пластмас швидкорізальними і твердосплавними інструментами з однаковими геометричними параметрами і режимами різання сили різання практично однакові, то застосування інструментів з натуральних або синтетичних алмазів при тих же умовах знижує силу  $P_z$  до 2 разів, а силу  $P_y$  від 4 до 6 разів.

Геометричні параметри інструментів мають на сили  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$  великий вплив. Найбільш сильний вплив надає передній кут, при збільшенні значення кута від 20 до 40° сили зменшуються від 2 до 4 разів [76].

Зміна швидкості різання в широкому діапазоні незначно впливає на зміну абсолютних значень сил, але змінює частоту та амплітуду їх коливання, особливо при різанні композиційних пластмас.

Глибина і подача при різанні пластмас вчиняють різний вплив на сили різання.  $P_z$  і  $P_y$  збільшуються, а сила  $P_x$  зменшується; при різанні вініпласту збільшення подачі призводить до зменшення сил  $P_y$  і  $P_x$ .

Зростання сили  $P_y$  призводить до відтискання заготовки в процесі різання, порушення геометричної форми і точності її розмірів.

Мінімальна шорсткість і найвища точність обробленої поверхні деталей, які можна отримати за допомогою оброблення різанням, коливаються в досить широких межах і залежать від великої кількості факторів. Головними з них є марки оброблюваного та інструментального матеріалів, геометричні параметри та якість заточування різального клина інструменту, режими різання, стан обладнання.

Спроби механічного перенесення закономірностей процесу різання металів і рекомендацій щодо окремих видів їх оброблення на процес різання пластмас, як показала практика, успіху не мали, оскільки пластмаси – особлива, порівняно з металами, група матеріалів, що має специфічні властивості, які зумовлюють закономірності та особливості процесу їх різання. Склад та технологія отримання пластмас відмінні від складу та технології отримання металів, що й обумовлює специфіку їх властивостей. Пластмаси в порівнянні з металами мають малу щільність, низькі механічні характеристики при великому їх коливанні, анізотропію властивостей, низьку теплостійкість і теплопровідність, тому збіг закономірностей процесу їх різання навіть теоретично очікувати неможливо.

Процес різання пластмас доцільно розглядати як самостійний, що має певні закономірності та специфіку. Вивчення та практичне використання закономірностей процесу різання пластмас дозволять керувати ним з метою підвищення продуктивності та ефективності оброблення. Порівняння закономірностей процесу різання пластмас із закономірностями процесу різання металів необхідно для того, щоб врахувати їхню відмінність при обробленні пластмас на металорізальних верстатах, при використанні металорізального інструменту та ін.

Загальною закономірністю процесу різання пластмас і його особливістю в порівнянні з різанням металів є велика кількість теплоти, що йде в інструмент. Ця закономірність пояснюється низькою теплопровідністю пластмас.

## **1.6 Аналіз впливу різних факторів на шорсткість поверхні та точність розмірів деталей, що оброблюються після 3D- друку**

На шорсткість обробленої поверхні деталей з пластмас впливають такі фактори: вид матеріалу пластмас, марка інструментального матеріалу, геометричні параметри інструменту, режими різання, знос інструменту, застосування МОР та ін. [76]

Вплив властивостей оброблюваного матеріалу проявляється в процесі стружкоутворення і багато в чому залежить від його стану і структури. При обточуванні термопластів можна отримати шорсткості поверхні до  $R_a = 0,63$  мкм, тоді як обточування термореактивних пластмас за найоптимальніших умов дозволяє отримати параметр шорсткості не більше 5 мкм (за винятком гетинаксу).

Інструментальний матеріал впливає на шорсткість поверхні своєю здатністю давати найменший радіус заокруглення різальної кромки леза інструменту та теплопровідністю. Тому найнижча шорсткість поверхні виходить при обточуванні алмазними різцями, що мають найменший радіус заокруглення різальної кромки леза ( $Ra$  від 1 до 3 мкм) та найбільшу теплопровідність.

Передній і задній кути різців при обточуванні термо- і реактопластів впливають на шорсткість поверхні по-різному, та їх мінімальні значення визначають експериментально. Низька шорсткість поверхні забезпечується, якщо головний кут у плані знаходиться в межах від 30 до 60°.

У міру збільшення допоміжного кута в плані від 10 до 25° шорсткість поверхні збільшується від 1,2 до 1,4 разів. Його вплив можна зменшити збільшенням радіусу при вершині різця.

З елементів режиму різання на шорсткість поверхні найбільше впливає подача. При збільшенні подачі від 0,2 до 0,25 мм/об спостерігається різке збільшення висоти нерівностей, сколи кромки поверхонь.

Глибина та швидкість різання на шорсткість поверхні істотно впливають. При роботі гострим різальним інструментом коливання висоти нерівностей, як показали вимірювання, виходить, як правило, за межі одного класу. Окрім впливу параметрів різального інструменту, дослідниками [77,78] запропоновано ряд конструкцій пристроїв для підвищення точності оброблення виробів.

Особливістю виробів, виготовлених за методом FDM, є схильність до яскраво вираженої анізотропії. Механічні властивості готового виробу різні за різними напрямками всередині матеріалу. Також одним серйозним недоліком є те, що помітні шви між шарами, що позначається на шорсткості готового виробу і залежить від процентної заповненості матеріалу.

Звичайно, за точністю розмірів та форми вироби, виготовлені за методом FDM, поступаються методом стереолітографії, проте метод FDM знайшов широке застосування у більшості дизайнерських завдань та у простих побутових 3D-принтерах. Насамперед, за рахунок невеликої собівартості виготовлення виробу, а також порівняльної простоти поводження з установкою.

## **1.7 Вибір об'єкта досліджень**

Естетична привабливість, точність розмірів і шорсткість поверхні критична для всіх виробів. Естетика і поверхневе функціонування деталі є важливим фактором через шорсткість поверхні. На якість і точність друкованого об'єкта під час друку впливають ряд змінних процесу друку, включаючи контурний кут, растр і кут растру, кут орієнтації, товщину шару та повітряний зазор. Процес виробництва шару екструдером призводить до того, що поверхня надрукованої деталі деформується. Цей ефект здебільшого спричинений тим, як один шар прилягає до іншого, що призводить до очікуваної шорсткості на кінцевій поверхні FDM-деталі.

Якість механічних виробів зазвичай відноситься до оброблення поверхні виробу. Якщо у продукті поверхня шорстка, починають утворюватися тріщини

і спричиняють пошкодження. Оздоблення поверхні впливає на структуру виробу, стійкість до корозії. Точність кінцевого виробу може досягатись не тільки методом FDM-друку. Дослідники намагалися реалізувати вимоги за допомогою різних рівнів параметрів друку і з різними підходами нарізки, але було встановлено, що є необхідність механічного дооброблення відповідальних поверхонь.

Виходячи з проведеного аналізу можна констатувати, що ABS (Акрилонітрилбутадієнстирол)-пластик є одним із найпопулярніших в світі матеріалів для 3D-друку, тому що він досить міцний і ним відносно легко друкувати. Також CoPET є одним із найбільш поширених матеріалів у 3D-друці через свою низьку вартість, простоту друку та стійкість до багатьох агресивних чинників. Тому було запропоновано для виробів з даних матеріалів провести комплексне технологічне дослідження з визначення впливу різних факторів на якість виробів.

Одним з рішень задачі покращення функціональності деталей, отриманих FDM-друком, є механічне оброблення відповідальних поверхонь і може бути виконана за допомогою різноманітних інструментів та методів, включаючи токарне оброблення, фрезерне оброблення, в томі числі на верстатах з ЧПК.

Одним із головних питань забезпечення якості деталей, отриманих FDM друком, є забезпечення комплексного підходу до якості виробу, що включає в себе: отримання, при застосуванні постоброблення, точності відповідальних поверхонь згідно з технічними вимогами, необхідна шорсткість, міцностні характеристики матеріалу, дизайн форми з мінімізацією маси деталі.

Механічне оброблення при застосуванні верстатів з ЧПК з відповідною стратегією оброблення відповідальних поверхонь та застосуванням високоточних верстатних пристроїв дозволить значно підвищити точність деталей, а також покращити зовнішній вигляд.

## **1.8 Висновки до розділу 1. Мета і завдання досліджень**

1. Проведено дослідження та аналіз наукових досліджень застосування технологій 3D-друку показав, що FDM-друк є відносно дешевим та швидким методом виготовлення деталей, однак отримані деталі можуть мати недоліки у вигляді неідеальної поверхні та відхилень від заданих розмірів. Механічне оброблення деталей, отриманих за допомогою FDM-друку, дозволяє усунути ці недоліки та забезпечити високу якість та точність деталей. Застосування механічного оброблення може зменшити кількість відбракованих деталей та збільшити ефективність виробництва. Крім того, впровадження механічного оброблення деталей, отриманих за допомогою FDM-друку, може допомогти зменшити потребу використання лиття під тиском, оскільки деталі не будуть поступатися по точності та якості.

2. Переважна більшість літературних джерел демонструє ефективність застосування деталей машин, отриманих 3D-друком, але в багатьох випадках до якості та точності поверхні пред'являються високі вимоги та потребують постоброблення поверхонь для надання якісного дизайну виробу або точності виконавчих розмірів з низькою шорсткістю поверхні.

3. При аналізі експериментальних досліджень процесу друку деталей машин, отриманих 3D-друком, встановлено, що завдяки підбору технологічних параметрів обладнання для 3D-друку не вдається отримати необхідну точність та шорсткість поверхонь деталей, отриману після друку.

4. Аналіз сучасних конструкцій обладнання та машин 3D-друку показав переваги і недоліки роботи різних конструкцій обладнання.

5. З аналізу літературних джерел встановлено, що вплив на точність та шорсткість деталей машин, отриманих 3D-друком, можливий при застосуванні постоброблення, відповідальних поверхонь згідно з технічними вимогами, при досягненні необхідної шорсткості, при рекомендованих міцностних

характеристиках матеріалу, з мінізацією маси деталі та визначення оптимальних параметрів вибору різального інструмента та режимів різання.

6. Дослідження технологічного забезпечення якості деталей машин, отриманих 3D-друком, залишається як вагомим науково-технічним завданням, так і важливим напрямком розвитку машинобудування. Тому дослідження забезпечення якості деталей машин, отриманих 3D-друком, є актуальним завданням.

На основі аналізу науково-технічної літератури та патентних джерел було сформульовано мету й основні завдання дослідження.

Метою дисертаційної роботи є вивчення технологічного забезпечення якості деталей машин, отриманих 3D-друком.

Поставлена мета може бути реалізована шляхом вирішення наступних задач:

- на основі комплексного аналізу особливостей методів тривимірного друку, характеристик існуючого обладнання та властивостей матеріалів, що застосовуються в адитивних технологіях, сформулювати цілісне уявлення про актуальний стан та напрями розвитку досліджень і розробок з метою розробки високоефективних технічних рішень;
- розробити фізичну модель процесу механічного оброблення заготовок, отриманих FDM друком з ABS та CoPET пластику;
- побудувати математичні моделі процесів оброблення обточуванням та фрезеруванням заготовок, отриманих FDM-друком з ABS та CoPET пластику;
- аналітично визначити залежність пластичних зворотніх деформацій поверхні деталей, отриманих FDM-друком, в процесі механічного оброблення, застосувавши закон Гука для пласкої одиничної поверхні;
- сформулювати методику проведення експериментальних досліджень та розробити реєструючу апаратуру;

- дослідити вплив технологічних та конструктивних параметрів різального інструменту на точність та шорсткість оброблених поверхонь, отриманих FDM-друком;
- визначити рекомендовані режими різання для оброблення, деталей отриманих за допомогою FDM-друку, при температурному режимі, що не призводить до порушення якості поверхні деталей;
- проаналізувати особливості процесу фрезерування пластмас після 3D-друку на верстатах з ЧПК;
- дослідити міцнісні характеристики деталей, отриманих за допомогою FDM-друку із ABS та CoPET пластику;
- надати рекомендації щодо оптимізації конструкції деталей машин для ефективного адитивного виробництва за допомогою SolidWorks Simulation;
- спроектувати модернізоване оснащення для оброблення поверхонь з одного установи при фрезеруванні складних поверхонь на верстатах з ЧПК;
- сформулювати прикладну методологію призначення режимів різання та вибору різального інструменту при застосуванні верстатів з ЧПК і запропонувати практичні рекомендації розробнику.



## РОЗДІЛ 2

### АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПЛАСТМАС ОБТОЧУВАННЯМ ТА ФРЕЗЕРУВАННЯМ ПІСЛЯ 3D-ДРУКУ ТА ВІБІР ОПТИМАЛЬНОЇ СТРАТЕГІЇ ОБРОБЛЕННЯ ПОВЕРХОНЬ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК

#### 2.1 Визначення основних фізичних факторів, що діють в зоні різання пластмас отриманих 3D- друком та основні припущення

Процес різання пластмас доцільно розглядати як самостійний, що має певні закономірності та специфіку. Вивчення та практичне використання закономірностей процесу різання пластмас дозволять керувати ним з метою підвищення продуктивності та ефективності оброблення. Порівняння закономірностей процесу різання пластмас із закономірностями процесу різання металів необхідно для того, щоб врахувати їхню відмінність при обробленні пластмас на металорізальних верстатах, при використанні металорізального інструменту та ін. Взаємодію різального інструменту та матеріалу заготовки з пластмаси представлено на рис. 2.1.

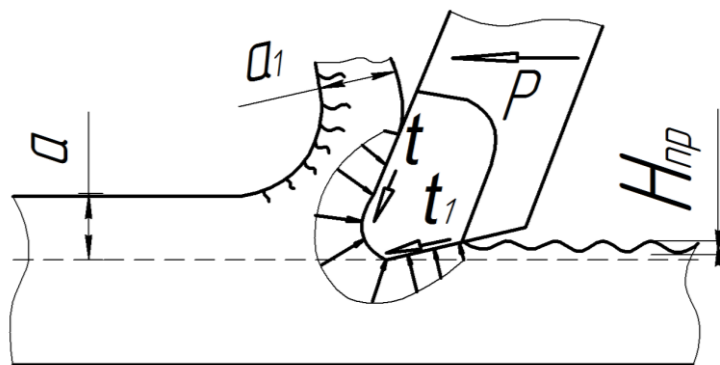


Рис. 2.1. Схема взаємодії різального інструменту та матеріалу заготовки з пластмаси:  $a$  – товщина зрізуваного шару;  $a_1$  – товщина зрізаного шару (стружки);  $P$  – сумарна сила різання;  $t$  та  $t_1$  – сили тертя по передній та задній поверхні інструмента;  $H_{np}$  – величина пружних відтискань

При різанні матеріалу заготовок з пластмаси спостерігається пружна деформація матеріалу заготовки завдяки низькому модулю повздовжньої пружності  $E =$  від 1,4 до 4 МПа, що нижче на два порядки ніж у металів. Завдяки цьому матеріал заготовки, після проходження зони різання, відтискається на  $H_{np}$  – величину пружних відтискань (див.рис. 2.1).

Розглянемо закон Гука для двовісного напруженого стану [78].

У разі двовісного напруженого стану необхідно покласти

$$\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0. \quad (2.1)$$

де  $\sigma$  – нормальні механічні напруження;

$\tau$  - дотичні напруження.

Тоді у результаті отримаємо:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y); \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x); \\ \gamma_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E}\tau_{xy}. \end{cases} \quad (2.2)$$

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$  – деформації зсуву;

$E$  – модуль пружності першого роду;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона;

$G$  – модуль зсуву.

Деформація  $\varepsilon_z$  може бути знайдена наступним чином:

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y). \quad (2.3)$$

Деформації зсуву:

$$\gamma_{vz} = \gamma_{zx} = 0.$$

Таким чином, для двовісного напруженого стану маємо формулу (2.3) узагальненого закону Гука.

У головних осях деформації зсуву відсутні, а формула (2.3) має вигляд:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu\sigma_2); \\ \varepsilon_2 = \frac{1}{E}(\sigma_2 - \nu\sigma_1). \end{cases} \quad (2.4)$$

Якщо рівність (2.3) вирішити щодо напружень, то отримаємо:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_x - \nu\varepsilon_y); \\ \sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_y - \nu\varepsilon_x); \\ \tau_{xy} = G\gamma_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)}\gamma_{xy}. \end{cases} \quad (2.5)$$

З метою досягнення необхідної точності виготовлення розміру деталі, згідно з допуском, врахуємо пружні деформації поверхні, що оброблюється, відповідно до закону Гука (рис. 2.1).

Розглядаємо пласку модель взаємодії інструменту з поверхнею, що оброблюється на одиничній площині.

Для одиничної площі та довжини можна записати

$$F = E \cdot \Delta L, \quad (2.6)$$

де  $\Delta L$  – величина пружної деформації поверхні;

$F = P_y$  ( $P_v$ ) – сила, яка діє на поверхню, дорівнює силі різання;

$E = (1,4 \div 2,0) \cdot 10^3$  МПа.

Сили різання при механічному обробленні пластмас значно менші, ніж при обробленні металів. Наприклад, при обточуванні термопластів (фторопласт-4) сила  $P_z$  коливається в межах  $P_z$  від 2 до 50 Н, а при обточуванні реактопластів (склотекстоліт СТ) –  $P_z$  в межах від 5 до 250 Н [75].

При обточуванні склотекстоліту СТ сили, що діють на задніх поверхнях різців, становлять від 70 до 95 % значень сил  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$ . при різанні загостреним інструментом всього на 10 ... 20% перевищує силу  $P_y$ , а при зношуванні інструменту  $H_3$  від 0,12 до 0,18 мм сила  $P_y$  стає більшою за силу  $P_z$  і при подальшому зношуванні інструменту перевищує її від 1,25 до 1,5 рази. При різанні реактопластів спостерігається велике коливання абсолютних значень сил, пов'язане з переривчастим характером процесу стружкоутворення. Наприклад, при обточуванні того ж склотекстоліту СТ коливання всіх складових сил доходить від 60 до 80 % їх абсолютних значень із частотою від 5 до 20 Гц на секунду.

Слід підкреслити ще одну особливість сил під час різання пластмас. Якщо при різанні пластмас швидкорізальними і твердосплавними інструментами з однаковими геометричними параметрами і режимами різання сили різання практично однакові, то застосування інструментів з натуральних або синтетичних алмазів при тих же умовах знижує силу  $P_z$  до 2 разів, а силу  $P_y$  від 4 до 6 разів.

Геометричні параметри інструментів мають на сили  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$  великий вплив. Найбільше впливає передній кут, при збільшенні якого від 20 до 40° зменшуються сили від 2 до 4 разів.

В останні роки з'явилися роботи закордонних дослідників з оброблення пластмасових виробів, отриманих 3D-друком [76,79,81-90], але в роботах аналіз впливу режимів різання та рекомендації щодо впливу на точність отриманих параметрів оброблюваних поверхонь часткові або відсутні.

Визначимо основні припущення при створенні аналітичної моделі.

У процесі різання відбувається зрушення матеріалу об'єкту (різання) під дією сили  $P_z$  а сила різання  $P_y$  створює зони пластичної пружної деформації, які

відповідно дають зворотні пружні переміщення оброблюваних поверхонь, змінюючи розмір у більшу сторону, що виконується. Необхідно, щоби вони були меншими за допуск на розмір, особливо на чистових переходах.

Враховуємо, що сили різання залежать від різних факторів: глибини різання подачі, швидкості обертання шпинделя. Вплив температури в зоні різання не враховуємо.

## **2.2 Побудова та аналіз аналітичної моделі процесу обточування з урахуванням пружних деформацій матеріалу деталі**

Характеристики оброблення металів різцями дуже схожі на характеристики оброблення пластмас. Однак їх структура і склад накладають додаткові особливості. Через відносно низьку щільність, міцність і твердість пластмас опір стисненню і зсуву при різанні низький, а сили різання набагато менші, ніж при обробленні металів.

### **2.2.1 Аналіз залежності сили різання $P_y$ при обточуванні від різних параметрів режимів різання**

Для процесу обточування силою, що створює пружні деформації на поверхні заготовки, буде сила  $P_y$  (рис. 2.2).

Метою аналізу, що проводиться, є порівняння впливу режимів різання на величину пружних деформацій відповідальних поверхонь деталі, що призводять пружні відтискання та зміну розміру, що виконується.

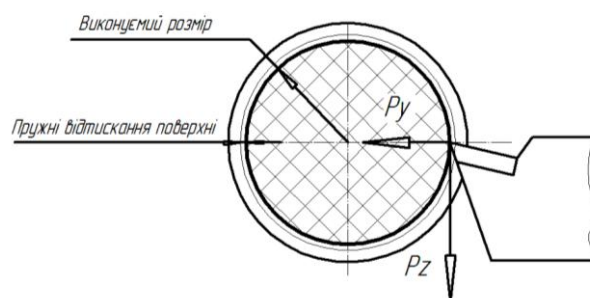


Рис. 2.2. Схема сил при різанні обточуванням матеріалу з пластмаси

Розглянемо вплив параметрів різання на зміну сили  $P_y$ .

Розрахунки проводимо у Excel за формулою:

$$P_y = 10 \cdot C_p t^x S^y V^n K_p, \quad (2.7)$$

де  $C_p = 35,5$  [102];  $X = 0,6$ ;  $Y = 0,8$ ;  $n = -0,3$ ;  $K_p = 1$ .

Розрахунки проведемо при зміні одного з параметрів при зафіксованих інших. Параметри режимів різання, від чистового виду оброблення до чорнового виду, змінюємо у межах:

глибина різання  $t = 0,5; 1; 1,5$  мм; подача  $S = 0,1; 0,2; 0,3$  мм.; швидкість  $V = 100; 200; 300$  м/хв.

У результаті проведених розрахунків отримали наступні залежності  $P_y$  від параметрів різання, які демонструють графіки рис. 2.3- 2.10. Інші результати розрахунків наведено у додатку С.

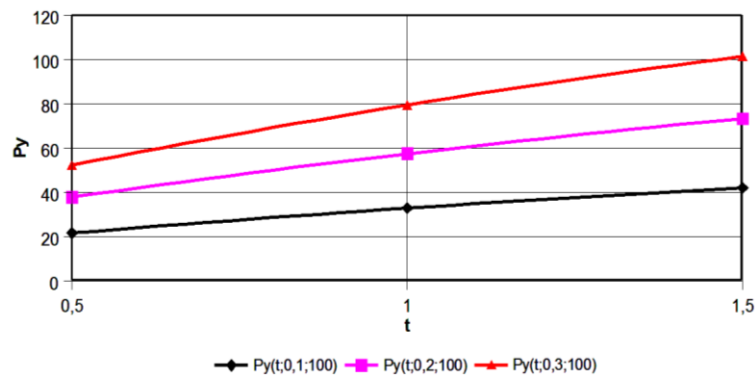


Рис. 2.3. Зміна сили різання  $P_y$  від глибини  $t$  при зміні подачі при швидкості 100 м/хв.

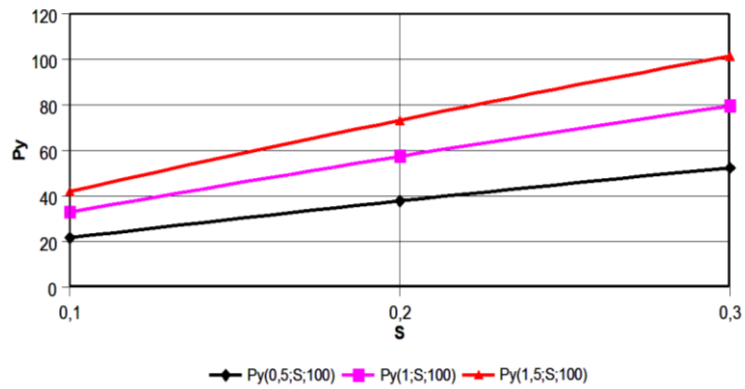


Рис. 2.4. Зміна сили різання  $P_y$  від подачі  $S$  при зміні глибини різання при швидкості 100м/хв.

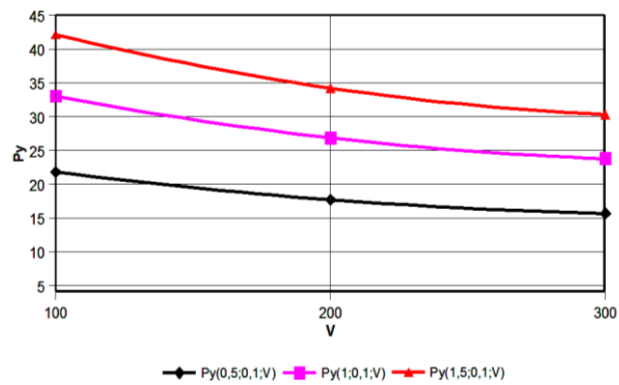


Рис. 2.5. Зміна сили різання  $P_y$  від швидкості  $V$  зі зміною глибини різання  $t$  при подачі  $S = 0,1$  мм/об.

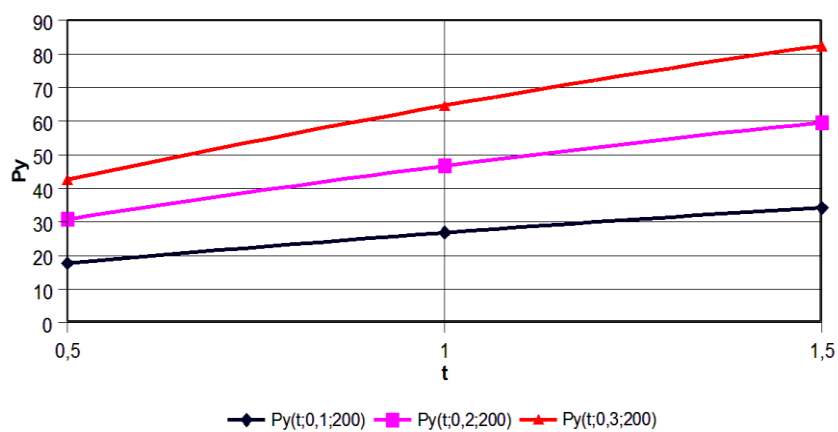


Рис. 2.6. Зміна сили різання  $P_y$  від глибини різання  $t$  зі зміною подачі  $S$  при швидкості  $V = 200$ м/хв.

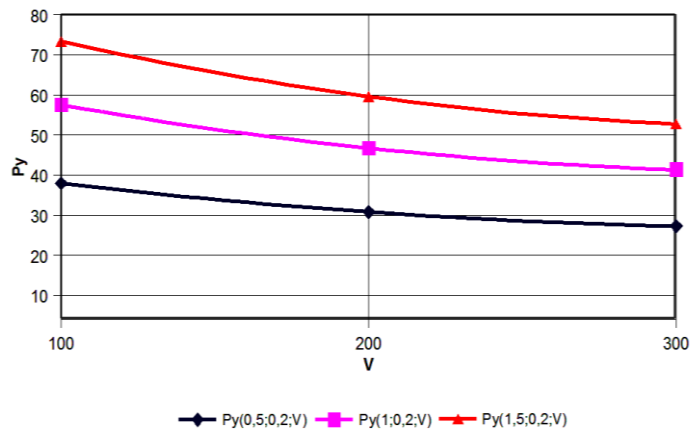


Рис. 2.7. Зміна сили різання  $P_y$  від швидкості  $V$  зі зміною глибини різання  $t$  при подачі  $S = 0,2$  мм/об.

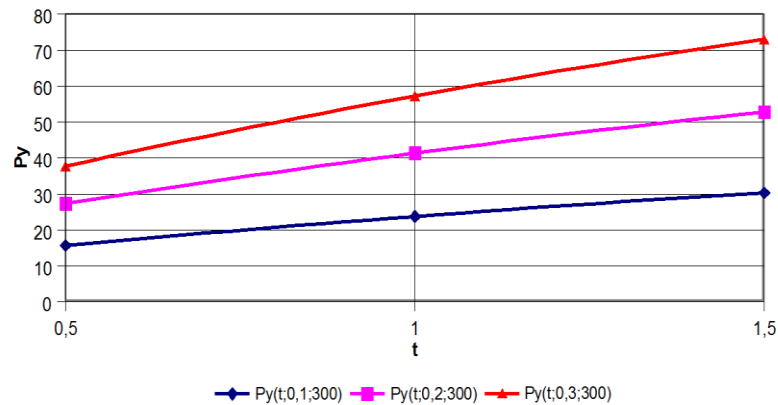


Рис. 2.8. Зміна сили різання  $P_y$  від глибини різання  $t$  зі зміною подачі  $S$  при швидкості  $V = 300$  м/хв.

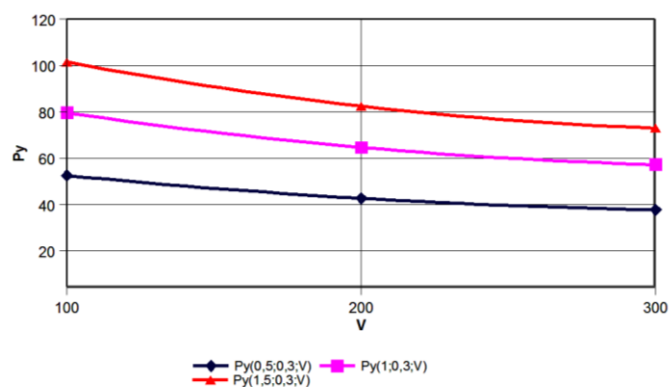


Рис. 2.9. Зміна сили різання  $P_y$  від швидкості  $V$  зі зміною глибини різання  $t$  при подачі  $S = 0,3$  мм/об.



На основі отриманих залежностей побудовано діаграми, які демонструють узагальнено вплив подачі  $S$ , глибини  $t$  та швидкості різання  $V$  на силу різання  $P_y$ .

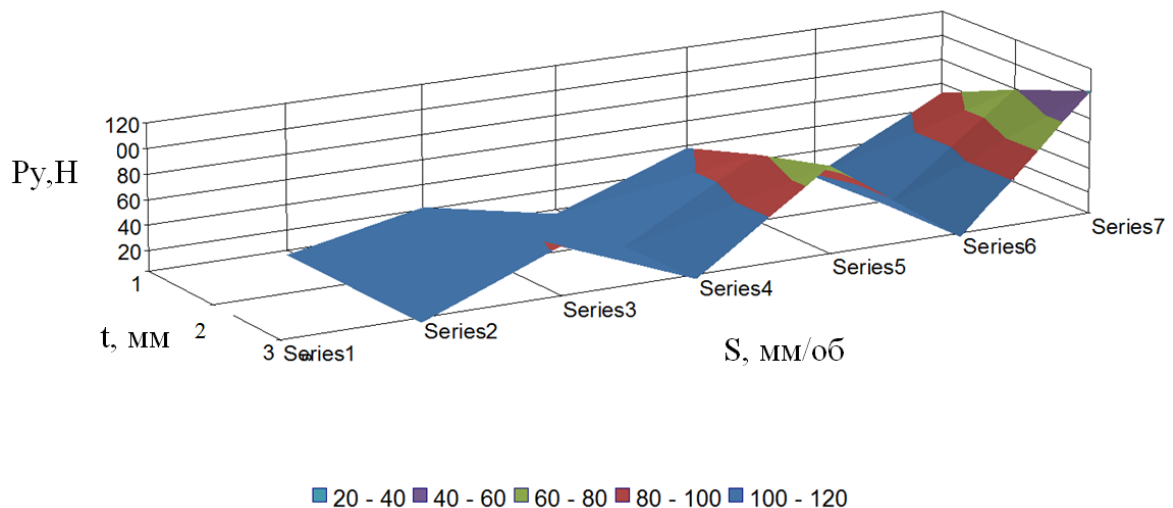


Рис. 2.10. Діаграма залежності сили різання  $P_y$  від глибини різання  $t$  зі зміною подачі  $S$  при зміні швидкості  $V$

З діаграм встановлено, що при чернових та чистових видах оброблення із збільшенням глибини різання та подачі сила різання  $P_y$  зростає, а збільшення швидкості різання знижує силу  $P_y$ .

### 2.2.2 Аналіз залежності пружних деформацій поверхні пластикових заготовок від сили різання $P_y$ при обточуванні від різних параметрів режимів різання

Попередньо визначивши залежність сили різання  $P_y$ , від зміни параметрів режимів різання у широкому діапазоні як для чистового обточування, так і для чорнових видів оброблення, проведемо розрахунки величини пружних відтискань поверхні заготовки, згідно з лінійним законом Гука. Розрахунки переміщень поверхні заготовки проведемо для пласкої моделі

взаємодії інструменту з поверхнею, що оброблюється на одиничній площині проведемо за формулою:

$$F = k \cdot \Delta l, \quad (2.8)$$

де  $F$  – сила, яка стискає;

$\Delta l$  – абсолютне стиснення або відтискання

$$k = \frac{E \cdot S}{L};$$

де  $E$  – модуль повздовжньої пружності;

$S$  – площа поверхні;

$L$  – довжина тіла.

Для одиничної площі  $S$  та довжини  $L$  можна записати

$$F = E \cdot \Delta l, \quad (2.9)$$

де  $\Delta l$  – величина пружної деформації поверхні повинна не перевищувати величину допуску на поверхню, 100 – 200 мкм;

$F = P_y$  – сила дорівнює силі різання;

$E$  – модуль повздовжньої пружності,  $E = (1,4-2,0) \cdot 10^3$ , МПа.

Величину стиснення поверхні матеріалу відповідно її відтисканню визначаємо за формулою:

$$\Delta l = \frac{P_z}{E}. \quad (2.10)$$

У результаті розрахунків отримано порівняльні діаграми величини пружних деформацій поверхні пластикових заготовок з різним модулем повздовжньої пружності для різних видів переходів від чистового до чорнового обточування із змінними параметрами, які представлені на рис. 2.11, рис. 2.12 та рис. 2.13.

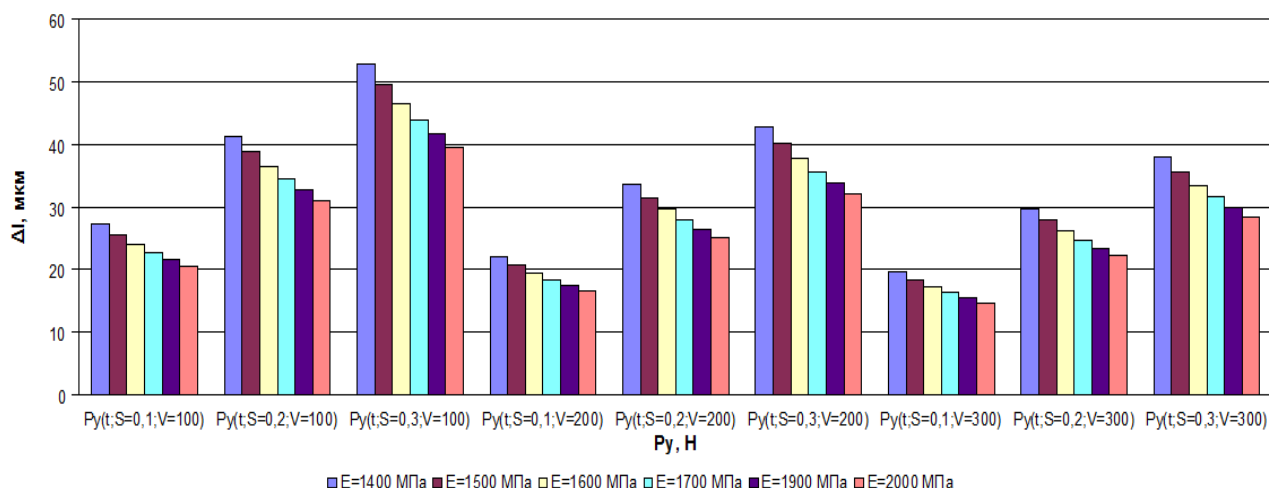


Рис. 2.11. Зміна величини пружних деформацій  $\Delta l$  поверхні пластикових заготовок з різним модулем повздовжньої пружності  $E$  від сили різання  $P_y$  при обточуванні з різними подачами  $S$  та швидкостями різання  $V$  при глибині різання  $t = 0,5$  мм

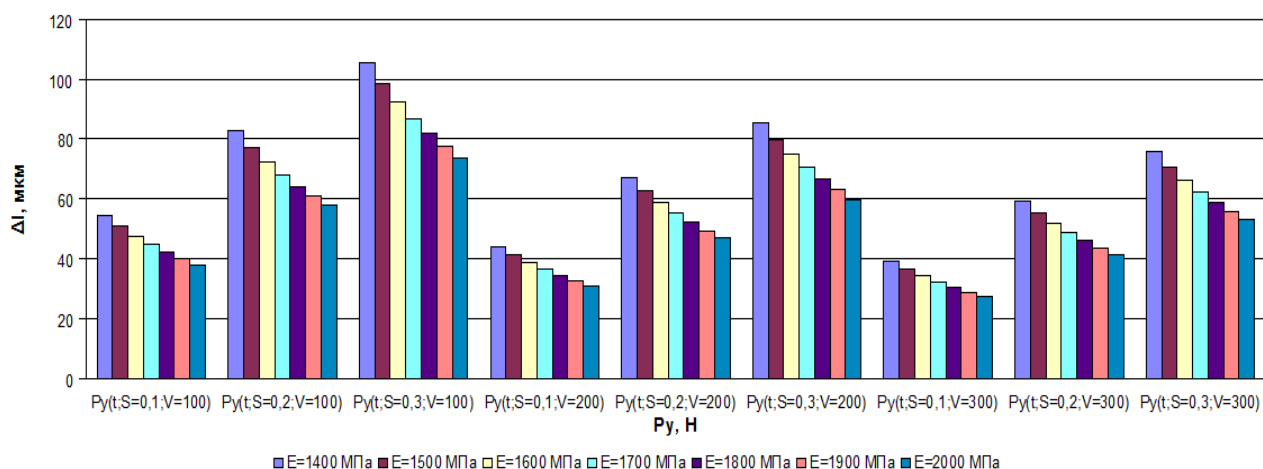


Рис. 2.12. Зміна величини пружних деформацій  $\Delta l$  поверхні пластикових заготовок з різним модулем повздовжньої пружності  $E$  від сили різання  $P_y$  при обточуванні з різними подачами  $S$  та швидкостями різання  $V$  при глибині різання  $t = 1$  мм

Проаналізувавши отримані результати по величині пружних деформацій поверхні пластикових заготовок, з різним модулем повздовжньої пружності для різних видів переходів від чистового до чорнового обточування із змінними

параметрами, встановлено, що зміна модуля повздовжньої пружності у меншу сторону значно впливає на величину відтискань поверхні. Подача та глибина різання збільшує значення величині пружних деформацій поверхні.

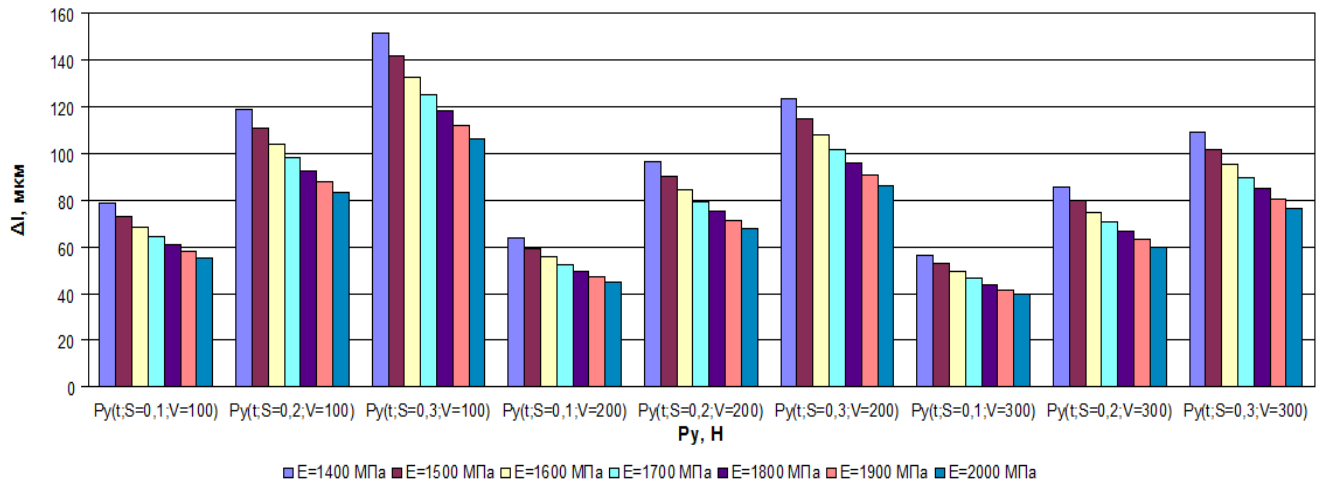


Рис. 2.13. Зміна величини пружних деформацій  $\Delta l$  поверхні пластикових заготовок із різним модулем повздовжньої пружності  $E$  від сили різання  $P_y$  при обточуванні з різними подачами  $S$  та швидкостями різання  $V$  при глибині різання  $t = 1,5$  мм

### 2.3 Побудова та аналіз аналітичної моделі процесу фрезерування з урахуванням пружних деформацій матеріалу деталі

Уявимо процес фрезерування кінцевою фрезою при несиметричному попутному фрезеруванні, що ріже шар матеріалу, який приблизно дорівнює діаметру фрези. Розглянемо які сили діють в процесі оброблення згідно з рис. 2.14 та рис. 2.15.

Результуюча сила  $P_V$  при фрезеруванні буде діяти нормально на поверхню деталі, створюючи пружні відтискання поверхні та зміну розміру, що отримується.

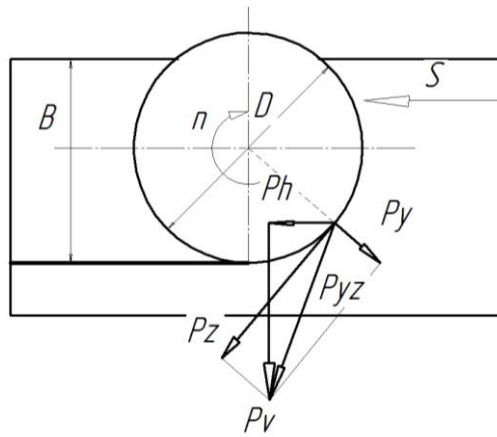


Рис. 2.14. Схема взаємодії кінцевої фрези та матеріалу заготовки з пластмаси при несиметричному попутному фрезеруванні :  $P_v$  – сила різання, що діє нормально до поверхні заготовки;  $B$  – ширина зрізаємого шару;  $D$  – діаметр фрези;  $\Delta l$  – величина пружних відтискань поверхні заготовки;  $S$  – подача верстата

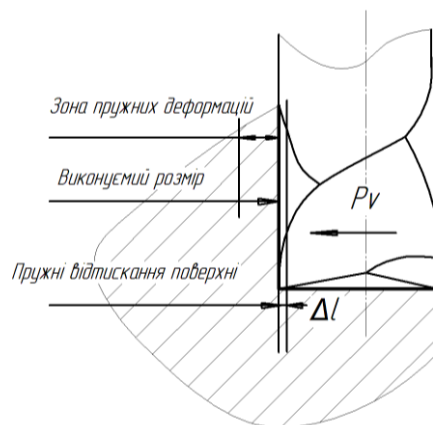


Рис. 2.15. Схема силової взаємодії кінцевої фрези та матеріалу заготовки з пластмаси з урахуванням пружних відтискань

### 2.3.1 Аналіз залежності сили різання $P_v$ при фрезеруванні від різних параметрів режимів різання

Розглянемо вплив параметрів різання на зміну сили  $P_v$ . Фреза кінцева суцільна Р6М5.

Розрахунки проводимо у Excel за формулою:

$$P_z = \frac{10C_p t^x S_z^y B^u Z}{D^q n^w} K_{Mp, H}, \quad (2.11)$$

де  $C_p = 82$  [102];  $X = 0,75$ ;  $Y = 0,6$ ;  $u = 1$ ;  $q = 0,86$ ;  $w = 0$ ;  $K_{Mp} = 1$ .

При несиметричному попутному фрезеруванні  $R_V = P_z(0,9 - 1,0)$ .

На графіках рис. 2.16-2.19 та додатку С представлені результати розрахунків сили різання  $P_V$  залежно від режимів різання.

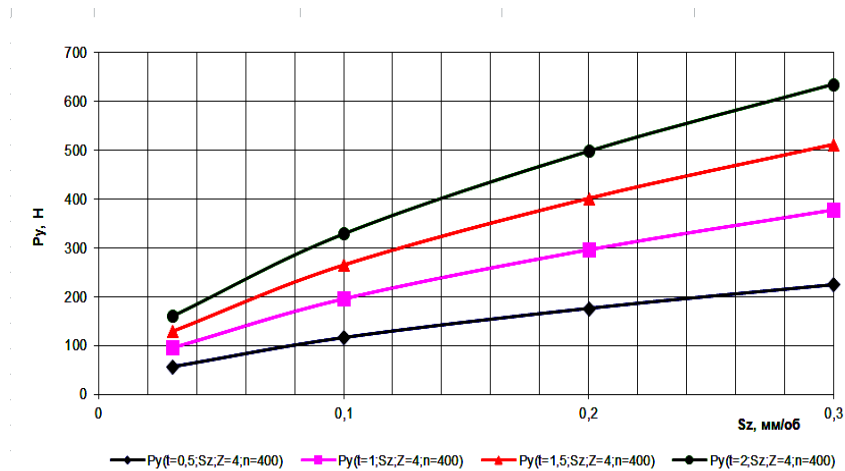


Рис. 2.16. Зміна сили різання  $P_V$  від подачі різання  $S_z$  зі зміною глибини різання  $t$  при обертах  $n = 400$  об/хв. для фрези з 4 зубцями

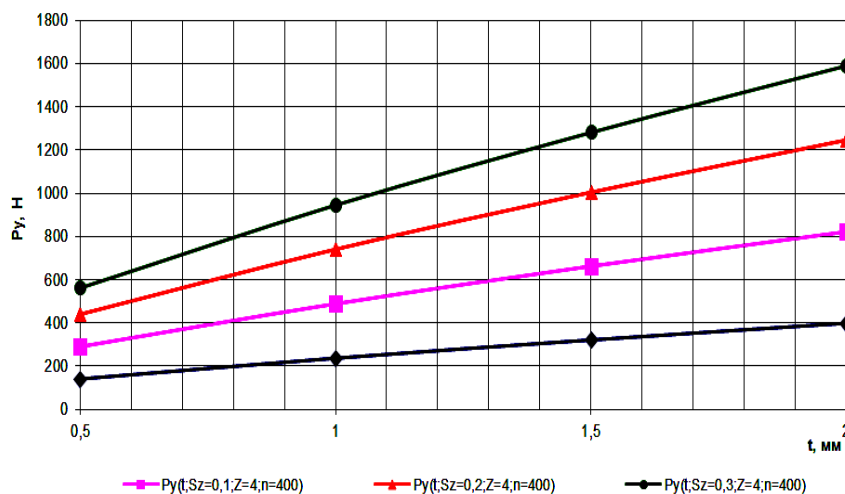


Рис. 2.17. Зміна сили різання  $P_V$  від глибини різання  $t$  зі зміною подачі різання  $S_z$  при обертах  $n = 400$  об/хв для фрези з 4 зубцями

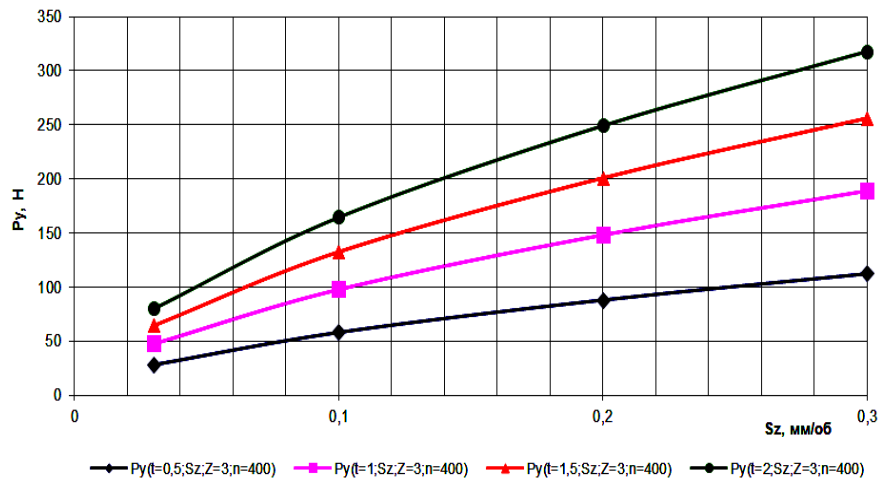


Рис. 2.18. Зміна сили різання  $P_V$  від подачі різання  $S_z$  зі зміною глибини різання  $t$  при обертах  $n = 400$  об/хв. для фрези з 3 зубцями

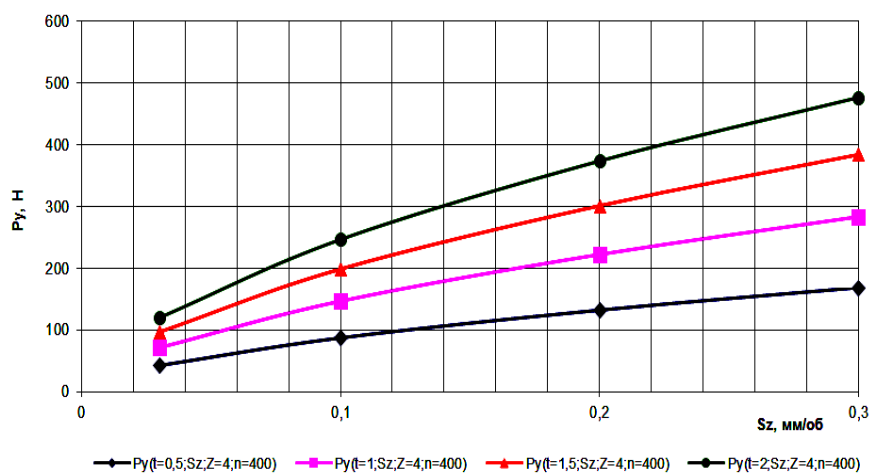


Рис. 2.19. Зміна сили різання  $P_V$  від подачі різання  $S_z$  зі зміною глибини різання  $t$  при обертах  $n = 400$  об/хв. для фрези з 4 зубцями

З графіків рис. 2.16- рис. 2.19 встановлено, що при чорнових та чистових видах оброблення зі збільшенням глибини різання та подачі сила різання  $P_V$  зростає, а збільшення зубців з 3 до 4 збільшує силу різання  $P_V$ , збільшення швидкості різання призводить до зростання сили різання  $P_V$ .

### 2.3.2 Аналіз залежності пружних деформацій поверхні пластикових заготовок від сили різання $P_v$ при фрезеруванні від різних параметрів режимів різання

Визначивши залежність сили різання  $P_v$  від зміни параметрів режимів різання у широкому діапазоні як для чистового фрезерування, так і для чорнових видів оброблення, проведемо розрахунки величини пружних відтискань поверхні заготовки, відповідно до лінійного закону Гука.

Створення математичної моделі різання пластмаси при фрезеруванні базується на таких положеннях:

розрахунки переміщень поверхні заготовки проведемо для пласкої моделі взаємодії інструменту з поверхнею, що оброблюється, на одиничній площині;

для досягнення необхідної точності, згідно з допуском на поверхню, врахуємо пружні деформації поверхні, що оброблюється, згідно з законом Гука.

Відповідно до ф. 2.13 проведено у Excel визначення зміни величини  $\Delta l$  від параметрів:  $t$  – глибина при фрезеруванні, 0,5; 1; 1,5; 2 мм;  $S_z$  – подача на зуб фрези, 0,03; 0,1; 0,2; 0,3 мм/об;  $B$  – ширина фрезерування, дорівнює діаметру фрези,  $B = 10$  мм.;  $Z$  – кількість зубців фрези 3; 4;  $n$  – число обертів фрези  $n = 400, 600, 1000, 1400$  об/хв.

Для пласкої моделі взаємодії інструменту з поверхнею на одиничній площині та довжини можна записати:

$$F = E \cdot \Delta l, \quad (2.12)$$

де  $\Delta l$  – величина пружної деформації поверхні повинна не перевищувати величину допуску на поверхню, від 100 до 200 мкм;

$F = P_v$  – сила дорівнює силі різання;

$E$  – модуль повздовжньої пружності,  $E = (1,4 \div 2,0) \cdot 10^3$ , МПа.

Стиснення матеріалу або відтискання визначаємо за формулою:



$$\Delta l = \frac{R_V}{E} \quad (2.13)$$

У результаті розрахунків отримано порівняльні діаграми для різних видів переходів від чистового до чорнового обточування зі змінними параметрами, які представлені на рис. 11, рис. 12, рис. 13 та наведені у додатку С.

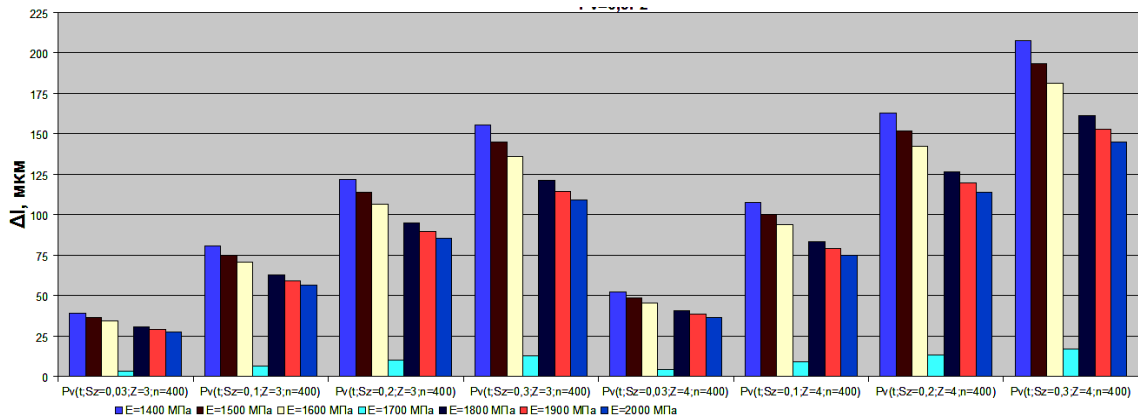


Рис. 11. Діаграма зміни величини пружної деформації поверхні  $\Delta l$  заготовки при чистовому фрезеруванні при  $t = 0,5$  мм з різними подачами  $S_z$  та обертами фрези  $n$  при змінному модулю повздовжньої пружності  $E$  при кількості зібців фрези  $Z=3$  та  $Z = 4$  мм ( $K_{mp} = 1$ ;  $P_V = P_Z$ )

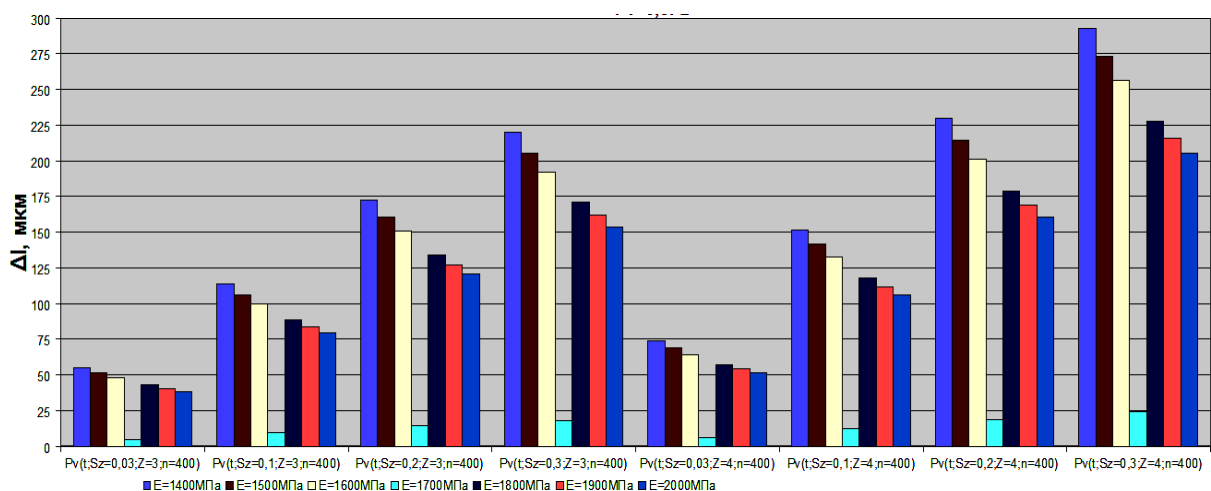


Рис. 12. Діаграма зміни величини пружної деформації поверхні  $\Delta l$  заготовки при чистовому фрезеруванні при  $t = 1$  мм із різними подачами  $S_z$  та обертами

фрези  $n$  при змінному модулю повздовжньої пружності  $E$  при кількості зібців  
фрези  $Z=3$  та  $Z=4$  ( $K_{mp} 1$ ;  $P_v = P_z$ )

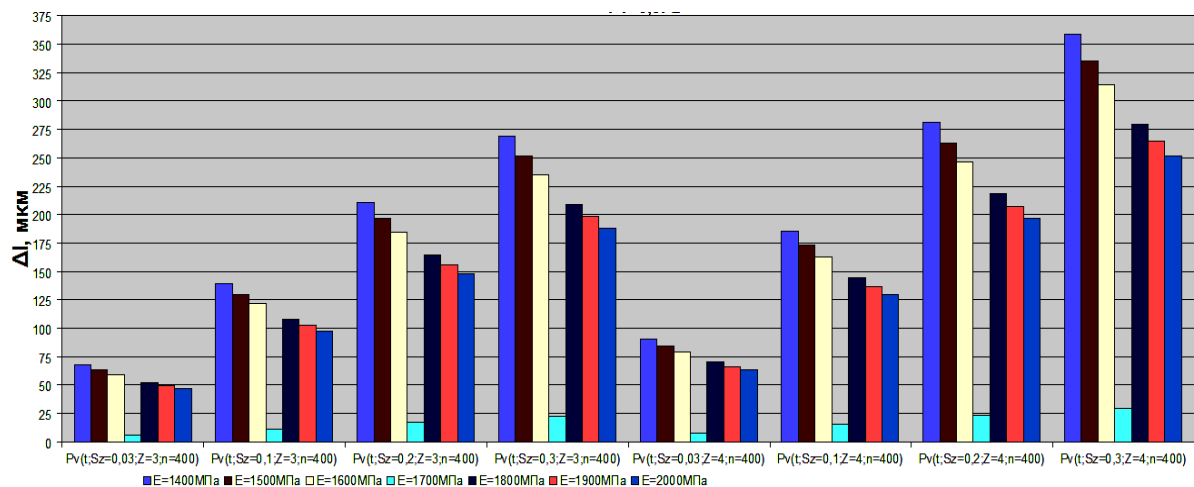


Рис. 13. Діаграма зміни величини пружної деформації поверхні заготовки  $\Delta l$  при чорновому фрезеруванні при  $t = 1,5$  мм з різними подачами  $S_z$  та обертами фрези  $n$  при змінному модулю повздовжньої пружності  $E$  при кількості зібців фрези  $Z = 3$  та  $Z = 4$  ( $K_{mp} 1$ ;  $P_v = P_z$ )

З аналізу точності виконання розмірів відповідальних поверхонь, з урахуванням пружних відтискань поверхні, можна констатувати, що пружні відтискання поверхонь при обточуванні значно більші при чорнових видах оброблення (від 130 до 150 мкм), ніж при чистових (від 44 до 65 мкм), а при чорновому фрезеруванні від 220 до 280 мкм та чистовому фрезеруванні від 45 до 65 мкм.

Для виробів, що мають дизайнерське призначення, можна рекомендувати режими оброблення, які дають найбільшу продуктивність, незважаючи на якість та точність поверхонь, що оброблюються, обмежуючись тільки температурним режимом різання.

## **2.4 Особливості процесу фрезерування поверхонь заготовок з пластмас після 3D- друку на верстатах з ЧПК**

При аналізі робіт [91,92] акцентовано увагу на методах отримання параметрів поверхонь деталі та заготовки, основних підходах при формуванні схем оброблення та виявлено основний параметр, що впливає на продуктивність оброблення, – величина гребінця  $h$ , що не зрізується.

Дослідженнями Кулика В. К., Петракова Ю. В., Палки К. И., Мацківського О. С. [93-97] встановлено, що процес оброблення 3D-поверхонь фасонною фрезою є суттєво нестаціонарним. Це призводить до того, що домінуючою складовою загальної похибки оброблення є змінна систематична похибка, закон зміни якої не є лінійним, а значення похибки відрізняється в декілька разів при обробленні різних ділянок заготовки. Крім того, при аналізі процесу фрезерування 3D-поверхні треба враховувати, що він протікає в замкненій пружній технологічній системі і виникнення похибки від пружних деформацій потрібно розглядати саме в такому контексті.

Розвиток комп'ютерних технологій і їх впровадження в сучасну промисловість призвели до докорінних змін в підході до вирішення задач формоутворення поверхонь складного профілю [98-100].

Використання верстатів ЧПК збільшило продуктивність і ефективність технологічних процесів за рахунок зменшення часу оброблення деталі та використання більш ефективних способів формоутворення.

Аналіз стратегій чистового та чорнового оброблення будемо виконувати на основі системи SolidWorksCAM [98], так як у програмі стратегії чітко представлені та наведенні рекомендації щодо їх застосування.

У SolidWorksCAM використовуються такі стратегії чорнового оброблення: контурне чорнове оброблення; растрове чорнове оброблення; гібридне чорнове оброблення ребер і чорнове дооброблення; чорнове дооброблення.

При реалізації стратегії контурного чорнового оброблення система SolidWorksCAM, як і при фрезеруванні глибоких виїмок, створює траєкторію інструмента для набору перетинів, утворених на певних рівнях  $Z$  з кроком, величина якого визначається параметром Stepdown (крок зниження).

При реалізації стратегії растрового чорнового оброблення система SolidWorksCAM створює лінійні растрові проходи для набору перетинів, утворених на певних рівнях  $Z$  з кроком, величина якого визначається параметром Stepdown (крок зниження). Растрове чорнове оброблення застосовується, головним чином, при використанні зношених інструментів і при обробленні м'яких матеріалів, оскільки траєкторія руху інструменту складається, в основному, з прямих відрізків.

Стратегія гібридного чорнового оброблення ребер призначена для оброблення дуже тонких стінок. Такі стінки виготовляються з екзотичних матеріалів (титан, графіт і ін.), і тому традиційні методи оброблення можуть бути ускладнені або ризиковані. Дана стратегія полягає в застосуванні як при чорновому, так і при чистовому обробленні нових унікальних траєкторій руху інструменту, що забезпечують збереження максимально можливої міцності деталі.

Стратегія чорнового дооброблення визначає області матеріалу, не оброблені на попередніх переходах і генерує траєкторію оброблення таких областей. У цій стратегії використовується інструмент меншого діаметру, ніж в попередніх переходах.

Проведемо огляд стратегій високошвидкісного чистового оброблення (HSM).

У SolidWorksCAM використовуються наступні стратегії чистового оброблення: оброблення при постійному рівні  $Z$ ; гібридна оброблення при постійному рівні  $Z$ ; гвинтове оброблення; горизонтальне оброблення; лінійне оброблення; радіальне оброблення; спіральне оброблення; поліморфне оброблення; фрезерування зі зміщенням; оброблення по граничній лінії; чистове дооброблення; тривимірне оброблення з постійним відступом; олівцеве

фрезерування; паралельне олівцеве фрезерування; трьохвимірне оброблення з кутовим відступом; оброблення призматичних деталей.

Для оброблення при постійному рівні  $Z$ , система створює траєкторію інструмента на підставі набору перетинів, утворених на різних рівнях  $Z$  з кроком, величина якого визначається параметром Stepdown (крок зниження). Ці перетини піддаються профільному обробленню.

Стратегія оброблення при постійному рівні  $Z$  зазвичай застосовується при напівчистовому і чистовому обробленні крутих ділянок моделі з кутом нахилу від 30 до 90 градусів. Оскільки відстань між проходами вимірюється уздовж осі  $Z$  системи координат, на пологих ділянках (при малих кутах нахилу поверхні) ця стратегія менш ефективна.

Гібридне оброблення при постійному рівні  $Z$  – стратегія чистового оброблення, яка володіє всіма перевагами традиційної стратегії оброблення при постійному рівні  $Z$  і тривимірного фрезерування виїмок. Останнє використовується як додаток до основної стратегії при обробленні пологих ділянок (з малою відстанню між послідовними проходами) і полягає в додаванні додаткових проходів. Цей метод дозволяє оптимізувати чистове оброблення всієї деталі. При використанні цієї стратегії гвинтового оброблення система SolidWorksCAM створює кілька замкнутих профільних перетинів, розташованих на різних рівнях  $Z$ , як і для оброблення при постійному рівні  $Z$ . Потім ці перетини об'єднуються в безперервну спадну спіраль.

При реалізації стратегії горизонтального оброблення система SolidWorksCAM розпізнає всі плоскі ділянки моделі і створює траєкторії руху інструменту, необхідні для їх оброблення. При реалізації стратегії лінійного оброблення система створює траєкторію руху інструменту, яка представляє собою набір паралельних проходів, розташованих під певним кутом, на відстані, що дорівнює значенню параметра Steptover (Крок відступу) один від одного.

Також при реалізації стратегії лінійного оброблення система SolidWorksCAM створює лінійні проходи, кожен з яких орієнтований під

кутом, рівним параметру Angle (Кут). Ця стратегія оброблення найбільш ефективна на пологих (майже горизонтальних) і дуже крутих поверхнях з паралельним напрямку проходів нахилом. Висота  $Z$  в кожній точці вздовж реєстрового проходу дорівнює висоті  $Z$  триангульованої поверхні з урахуванням поправок на зміщення і параметри інструменту.

При реалізації стратегії спірального оброблення система створює просторову траєкторію руху інструменту на основі спіралі. Ця стратегія оптимальна для оброблення моделей, утворених тілами обертання. Інструмент рухається по плоскій спіралі, розташованій в площині  $XY$  поточної системи координат.

При поліморфному обробленні система створює проходи, спрямовані поперек поверхні моделі і розташовані паралельно один одному, як і при лінійному обробленні. При цьому кожен прохід повторює контури попереднього з додаванням певних рис наступного, в результаті чого забезпечується «поліморфізм» траєкторій руху: вони плавно змінюють свою форму в міру переміщення інструменту з одного боку деталі на іншу.

Стратегія еквідистантного оброблення являє собою окремий випадок поліморфного оброблення. При реалізації стратегії еквідистантного оброблення система створює траєкторію руху інструменту, засновану на одній опорній кривій. Траєкторія інструменту проходить між опорною кривою і віртуальною зміщеною кривою, яка представляє собою копію опорної кривої з зазначеним зміщенням.

При реалізації стратегії оброблення по граничній лінії – траєкторія руху інструменту є проекцією певної опорної лінії на геометрію моделі. Глибина оброблення задається параметром Walloffset (зсув від стінки) щодо поверхні моделі. Стратегія оброблення по граничній лінії може використовуватися при гравіруванні на поверхнях моделі або для зняття фаски уздовж її ребер.

При реалізації стратегії чистового дооброблення система виявляє ділянки моделі, де після виконання попередніх переходів залишився

підлягаючий видаленню матеріал, а потім створює траєкторії руху інструменту, необхідні для оброблення цих ділянок.

При олівцевому обробленні вертикальних вузлів як стружкова канавка, так і радіус інструменту повністю контактують з матеріалом, в результаті чого створюються несприятливі для різання умови. При чистовому дообробленні кути обробляються зверху вниз, що більш технологічно. Круті і пологі ділянки моделі обробляються рухом по одній і тій же траєкторії, але з використанням різних стратегій чистового доопрацювання. При реалізації стратегії тривимірного оброблення з постійним відступом система створює просторову траєкторію руху інструмента щодо поверхонь оброблюваної деталі. Проходи розташовуються на рівній відстані один від одного, яка відкладається вздовж поверхні моделі.

При реалізації стратегії олівцевого фрезерування система прокладає траєкторію руху інструменту уздовж внутрішніх кутів і заокруглень невеликого радіусу. При цьому видаляється матеріал, що залишився після виконання попередніх переходів. Ця стратегія використовується для чистового оброблення кутів, на яких є параболічні сліди від попередніх переходів. Вона може бути корисна при обробленні кутів з радіусом кривизни, що не перевищують радіус інструменту.

Стратегія паралельного олівцевого фрезерування – це поєднання стратегій олівцевого фрезерування і тривимірного оброблення з постійним відступом.

На першому етапі система SolidWorksCAM створює траєкторію руху інструменту для олівцевого фрезерування. Потім отримані проходи використовуються для створення проходів для тривимірного оброблення з постійним відступом, які розташовуються щодо них з деяким зміщенням в обидві сторони.

Стратегія тривимірного оброблення з кутовим відступом аналогічна стратегії паралельного олівцевого фрезерування. Ця стратегія також є поєднанням стратегій олівцевого фрезерування і тривимірного оброблення з

постійним відступом. Однак на відміну від стратегії паралельного олівцевого фрезерування кількість зсувів визначається не користувачем, а автоматично. Система підбирає його таким чином, щоб обробити всю модель в межах граничної лінії.

Стратегія оброблення призматичних деталей призначена для високошвидкісного оброблення. Вона являє собою поєднання стратегій оброблення при постійному рівні  $Z$  і тривимірного оброблення з постійним відступом.

При обчисленні прийнятих за замовчуванням значень, технологічних параметрів, що забезпечують оптимізацію процесу оброблення, система бере до уваги параметри певної геометрії. Наприклад, мінімальний і максимальний рівень по осі  $Z$  цієї геометрії використовуються для обчислення кута нахилу поверхні і так далі. Система SolidWorksCAM дозволяє спільно використовувати дві стратегії оброблення в одному і тому ж переході HSM: оброблення при постійному рівні  $Z$  і горизонтальну, лінійну, тривимірне оброблення з постійним або кутовим відступом. Обидві стратегії реалізуються з використанням однієї і тієї ж геометрії, інструменту та обмежувальних ліній. Технологічні параметри розрахунку і зв'язування проходів визначаються для кожної стратегії окремо.

Особливістю процесу фрезерування поверхонь заготовок складної конфігурації є розробка стратегії та рекомендацій щодо вибору величини подачі (при необхідному кроку висоти гребінців) інструменту при обробленні складної профільної деталі з найменшим часом оброблення.

Аналітичне дослідження висоти гребінців при обробленні похилих площин отримано в роботах [99,100]. Нижче наведені результати для наступних випадків, які можна використати для оброблення заглиблень заготовки.

При похилій площині висота гребінця  $h$  (рис. 2.14) при чистовому обробленні похилої площини, що розташовується в заглибленні, визначається за формулою:



$$h = R - \sqrt{R^2 - (S / 2 \cos \gamma)^2}, \quad (2.14)$$

де  $R$  – радіус сферичної фрези, мм;

$S$  – міжрядкова подача (крок), мм;

$\gamma$  – кут нахилу площини заглиблення, град.

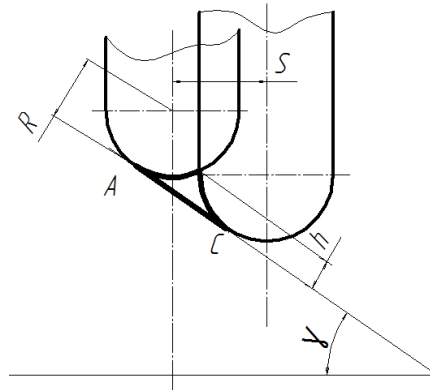


Рис. 2.14. Схема для визначення висоти гребінця при обробленні похилої площини заглиблення

При увігнутій циліндричній поверхні висота гребінця  $h$  (рис. 2.15) при чистовому обробленні увігнутої поверхні, що розташовується в заглибленні визначається за формулою:

$$h = \rho - \left\{ (\rho - R) \cos \left( \arcsin \frac{S}{2\rho} \right) + \sqrt{(\rho - R)^2 \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left( 2 \arcsin \frac{S}{2(\rho - R)} \right) \right] - \rho(\rho - 2R^2)} \right\}, \quad (2.15)$$

де  $\rho$  – радіус увігнутої поверхні заглиблення, мм.

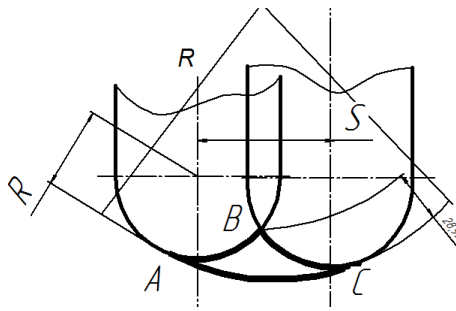


Рис. 2.15. Схема для визначення висоти гребінця при обробленні увігнутої поверхні заглиблення

В) Вплив нахилу поверхні (градієнта) на висоту гребінця (рис. 2.16).

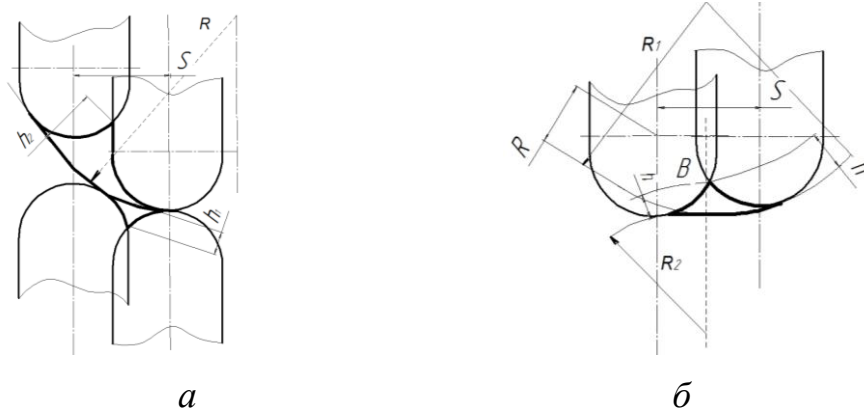


Рис. 2.16. Вплив нахилу поверхні (градієнта) на висоту гребінця  $h$ : *а* – при вигнутій поверхні, що описується одним радіусом; *б* – при криволінійній поверхні

Висновки з аналізу аналітичних залежностей: висота гребінців збільшується на стінках під дуже великим кутом нахилу до горизонту; найбільші гребінці при одній подачі помітні при обробленні увігнутих поверхонь меншого радіусу; у похилих площин розміри гребінців менші, ніж у ввігнутих поверхонь; якщо прийняти висоту нерівностей для площини за 100%, то для увігнутих поверхонь вона буде на 18% більше;

Для ефективного оброблення деталі слід обирати таку стратегію оброблення її поверхонь, яка при заданій висоті гребінця забезпечує найменший час оброблення.

Для отримання найкращого результату при видаленні значної кількості матеріалу із зони оброблення потрібно підібрати оптимальну стратегію.

Проаналізувавши наявні стратегії оброблення в системі SolidWorksCAM, можна зробити висновок, що найкраще для чорнового фрезерування підходить стратегія «З-ос. чорнова», яка дає можливість змінювати в процесі оброблення крок по осі z, що забезпечує краще видалення матеріалу. Зважаючи на те, що чорнове оброблення відбувається кінцевими фрезами із великими проходами по глибині, на нахилених стінках і радіусах залишаються гребінці значної висоти (рис. 2.16). Виникає необхідність проведення напівчистового оброблення, метою якого є забезпечення рівномірності залишеного під чистову оброблення шару припуску.

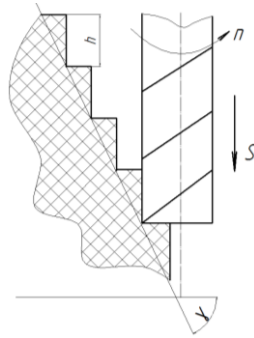


Рис. 2.16. Гребінці при чорновому фрезеруванні нахилених стінок під кутом  $\gamma$  кінцевою фрезою

У якості інструменту для напівчистового обробленням найкраще використати кінцеві фрези з округленнями та кінцеві сферичні фрези достатньої жорсткості. Для програмування напівчистового оброблення заглиблень в системі SolidWorksCAM за попереднім аналізом найкраще підходить стратегія «шарами по z» із використанням параметру змінного кроку в глибину.

Для заглиблень із плоским дном необхідно начисто обробити дно кінцевою або округленою фрезою. Для цього доцільно використати стратегію оброблення «З-ос. площина», яка забезпечує створення траєкторії близької до торцевого фрезерування.

Для чистового оброблення нахилених або радіусних стінок потрібно використати сферичну фрезу. Стратегія оброблення – «шарами по  $z$ ». Для забезпечення необхідної шорсткості поверхні при обробленні нахилених стінок, потрібно розрахувати крок зміщення фрези, так як це вказано у 2 розділі. При обробленні радіусних поверхонь, як описано у 2 розділі, необхідно застосувати змінний крок по осі  $z$ .

В окремих випадках при обробленні заглиблень існує необхідність доопрацювання внутрішніх кутів і спряжень невеликого радіусу. Для такого оброблення найкращим варіантом є стратегія «олівцеве фрезерування». Ця стратегія забезпечує траєкторію руху вздовж недооброблених кутів та спряжень. Для реалізації такого оброблення необхідні сферичні кінцеві фрези малого діаметру з великим вильотом та достатньою жорсткістю.

Отже можна назвати 4 основні та 1 додатковий перехід, які необхідні для якісного оброблення заглиблень виробу із використанням відповідних стратегій: чорнове фрезерування заглиблення (стратегія «3-ос. чорнова»); напівчистове фрезерування (стратегія «шарами по  $z$ »); чистове фрезерування дна (стратегія «3-ос. площина»); чистове фрезерування стінок (стратегія «шарами по  $z$ »); чистове доопрацювання кутів та спряжень – виконується при необхідності (стратегія «олівцеве фрезерування»).

Після вибору стратегії та введення параметрів інструмента генеруємо траєкторію руху інструмента (рис. 2.17).

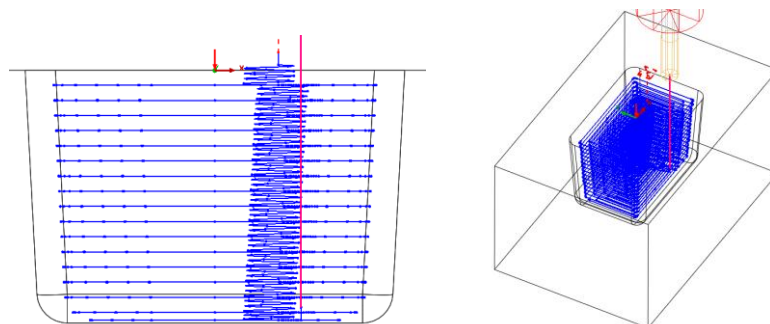


Рис. 2.17. Траєкторія руху інструменту при чорновому фрезеруванні призматичного заглиблення

Після імітації оброблення можна проаналізувати рівномірність залишеного припуску (рис. 2.18).

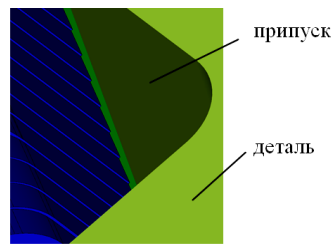


Рис. 2.18. Аналіз припуску при чорновому фрезеруванні призматичного заглиблення

Під час аналізу припуску можна побачити високі гребінці, які залишила кінцева фреза, їх потрібно зрівняти і забезпечити рівномірний припуск під чистове оброблення.

Для програмування напівчистового оброблення заглиблень в системі SolidWorksCAM за попереднім аналізом для нахилених стінок найкраще підходить стратегія «шарами по Z».

Для моделювання оброблення в якості інструменту обираємо кінцеву округлену фрезу.

Після вибору стратегії та введення параметрів інструмента генеруємо траєкторію руху інструмента (рис. 2.19).

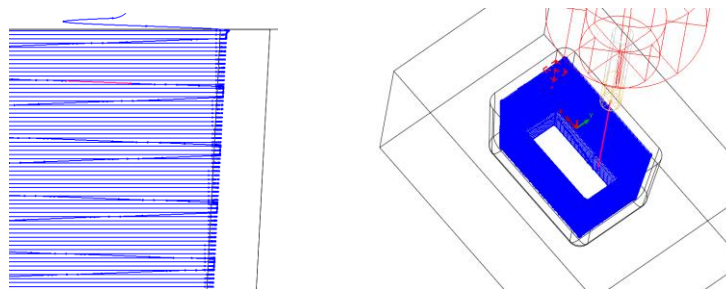


Рис. 2.19. Траєкторія руху інструмента при напівчистовому фрезеруванні призматичного заглиблення

Особливістю оброблення є постійний крок по Z, що найкраще підходить для оброблення нахилених стінок під кутом.

Після імітації оброблення можна проаналізувати рівномірність залишеного припуску (рис. 2.20).

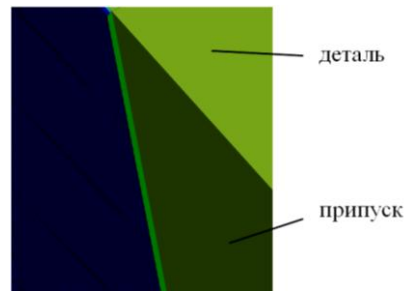


Рис. 2.20. Аналіз припуску після напівчистового фрезерування призматичного заглиблення

Наступним етапом програмування оброблення є чистове фрезерування дна заглиблення. Для оброблення дна використовуємо стратегію оброблення «З-ос. площина», яка забезпечує створення траєкторії близької до торцевого фрезерування. Для чистового оброблення нахилених або радіусних стінок потрібно використати сферичну фрезу. Стратегія оброблення – «шарами по Z». Для забезпечення необхідної шорсткості поверхні при обробленні нахилених стінок, потрібно розрахувати крок зміщення фрези. При обробленні радіусних поверхонь необхідно застосувати змінний крок по осі Z. Після вибору стратегії та введення параметрів інструмента генеруємо траєкторію руху інструменту (рис. 9).

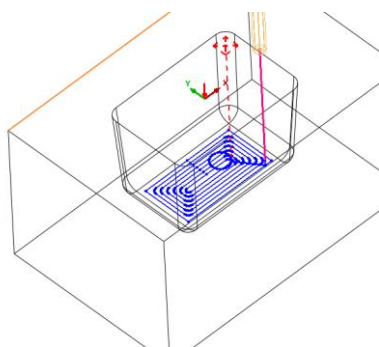


Рис. 2.21. Траєкторія руху інструменту при чистовому фрезеруванні дна призматичного заглиблення

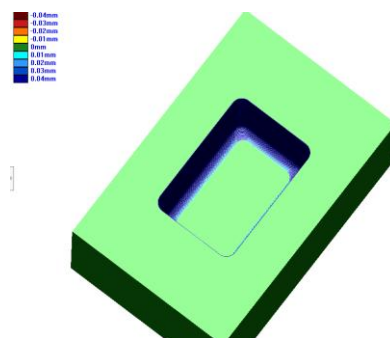


Рис. 2.22. Аналіз прогнозованої точності оброблення

Після генерації траєкторії та імітації оброблення маємо змогу оцінити прогнозовану точність оброблення (рис. 2.22).

Для програмування чистового оброблення заглиблень в системі SolidWorksCAM за попереднім аналізом для нахилених стінок найкраще підходить стратегія «шарами по z». Для моделювання оброблення в якості інструменту обираємо кінцеву сферичну фрезу. Після вибору стратегії та введення параметрів інструмента генеруємо траєкторію руху інструмента (рис. 2.23).

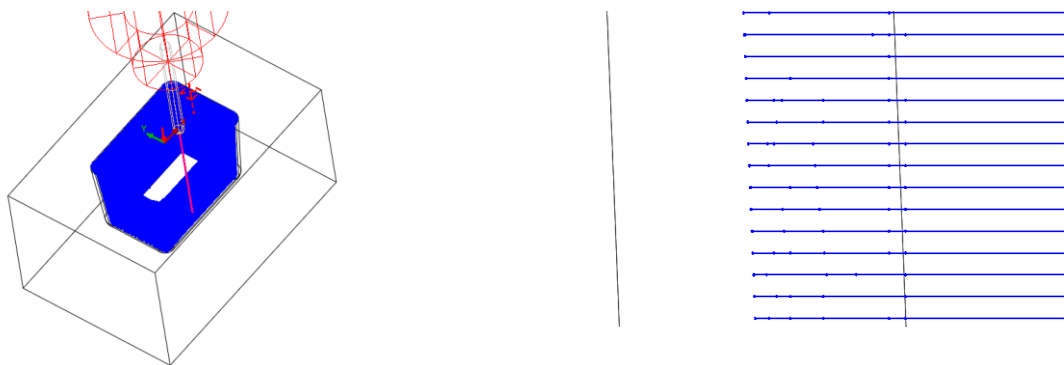


Рис. 2.23. Траєкторія руху інструмента при чистовому фрезеруванні нахилених стінок призматичного заглиблення

Після імітації оброблення можна проаналізувати прогнозовану точність оброблення (рис. 2.24).

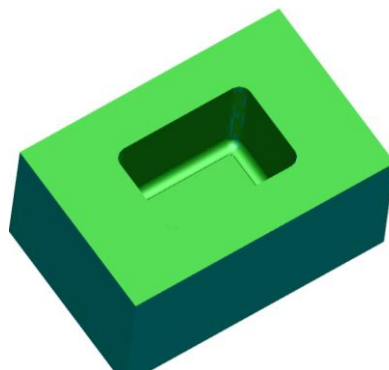


Рис. 2.24. Аналіз прогнозованої точності чистового фрезерування стінок призматичного заглиблення

Результати прогнозованого оброблення деталі при оптимальній стратегії оброблення її поверхонь, яка при заданій висоті гребінця і зміни подачі забезпечує найменший час оброблення, наведені в табл. 2.1.

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 рекомендовано алгоритм розрахунку траєкторії руху інструмента, який враховує процеси, що протікають при утворенні поверхні деталі, що дозволить управляти процесом оброблення за заданим алгоритмом.

Таблиця 2.1

Визначення необхідного кроку подачі фрези для забезпечення відповідної висоти гребінців в залежності від кута нахилу площини для фрези діаметром 6 мм

№ п.п	Крок (між рядкам) $s$ , мм	Висота гребінців $h$ поверхні, обробленої сферичною фрезою, мкм						
		Кут нахилу $\gamma^\circ$						
		$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$	$87^\circ$
		Діаметр фрези $D = 6$ мм						
1	0,01	0	0	0	0	0	0,1	1,5
2	0,02	0	0	0	0	0,1	0,2	6,1
3	0,03	0	0	0	0,1	0,2	0,6	13,7
4	0,04	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	1,0	24
5	0,05	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	1,6	38
6	0,1	0,4	0,4	0,6	0,8	1,7	6,2	156
7	0,2	1,7	1,8	2,2	3,3	6,7	25	687
8	0,3	3,8	4,0	5,0	7,5	15	57	2113
9	0,5	10,4	11,2	14	21	42	160	-
10	1,0	42	45	56	85	172	705	-



Наведені результати прогнозованого оброблення деталі (табл. 2.1) при оптимальній стратегії оброблення її складних поверхонь, яка при заданій висоті гребінця забезпечує найменший час оброблення дають можливість оцінити висоту ребінців (шорсткість) при виборі подачі верстата на різних поверхнях, розташованих під різними кутами [101].

## **2.5 Висновки до розділу 2**

1. При аналізі використаних джерел встановлено, що отримати низьку шорсткість та високу точність розмірів 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.

2. Проведено порівняння закономірностей процесу різання пластмас із закономірностями процесу різання металів з метою врахування їхніх відмінностей при обробленні на металорізальних верстатах, при використанні металорізального інструменту. Визначено основні фізичні фактори, що діють на поверхню заготовки в процесі різання.

3. Побудовано аналітичні моделі процесів обточування та фрезерування заготовок, отриманих 3D-друком, і проведено аналіз аналітичних моделей процесу обточування та фрезерування з урахуванням пружних деформацій поверхні пластикових заготовок на відмінність до оброблення металевих заготовок.

3. З аналізу аналітичних моделей, які описують точність виконання розмірів відповідальних поверхонь, з урахуванням пружних відтискань поверхні, можна констатувати, що пружні відтискання поверхонь при обточуванні значно більші при чорнових видах оброблення (від 130 до 150 мкм), ніж при чистових (від 44 до 65 мкм), а при чорновому фрезеруванні від

220 до 280 мкм та чистовому фрезеруванні від 45 до 65 мкм і є незначними в порівнянні з технічними вимогами до допусків на дані поверхні.

4. 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 необхідністю розробити такий алгоритм розрахунку траєкторії руху інструмента, який враховує процеси, що протікають при утворенні поверхні деталі та застосовувати програмно-математичне 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 прогнозованої оброблення деталі при оптимальній стратегії оброблення її поверхонь, яка при заданій висоті гребінця забезпечує найменший час оброблення.

## **РОЗДІЛ 3**

### **ПРОГРАМА, МЕТОДИКА ТА УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

#### **3.1 Програма проведення експериментальних досліджень**

Відповідно до мети роботи, визначених завдань та результатів проведених теоретичних досліджень, розроблено програму і методику експериментальних досліджень впливу різних технологічних параметрів процесу різання, конструктивних характеристик різального інструменту та властивостей матеріалів пластмас, отриманих методом 3D-друку. Згідно з цією методикою передбачено:

- спроектувати та виготовити експериментальні зразки, виготовлені 3D-друком, та стенд для дослідження їх основних параметрів і динамічних характеристик;
- провести порівняльні дослідження щодо точності та шорсткості різних методів механічного оброблення пластмас, виготовлених 3D-друком,
- провести експериментальні дослідження характеристик міцності деталей, отриманих за допомогою FDM-друку із ABS та CoPET пластику, та випробувань на зносостійкість.

Експериментальні дослідження проводились на верстатах підвищеної точності та спроектованих експериментальних установках і на існуючому обладнанні ХНУ.

Огляд технічної літератури та проведені аналітичні дослідження дозволили визначити, що основними характеристиками технологічного забезпечення якості деталей машин, виготовлених методом 3D-друку, є сукупність параметрів, а саме: точність розмірів відповідальних поверхонь, шорсткість і зносостійкість поверхні, міцність матеріалу до навантажень,

раціональний вибір різального інструменту, оптимальна конструкція 3D-моделі деталі [102].

### **3.2 Характеристика та властивості матеріалів, отриманих FDM друку із ABS та CoPET пластику**

Деталі, отримані на принтерах, використовуються як ремонтні запасні частини у якості прототипів, а також як повноцінні функціональні деталі в механізмах. Технологія FDM-друку значно спрощує процес виготовлення деталей складної форми, а постоброблення, в тому числі оброблення різанням на верстатах забезпечує достатню точність. При цьому залишається актуальним питання механічних властивостей виробу, оскільки процес друку передбачає пошарове наплавлення розплавленого матеріалу (філаменту). Таким чином виріб не можна розглядати як монолітний об'єкт з певного матеріалу. Для визначення максимальних навантажень, а також можливої пластичної поведінки надрукованих деталей, пропонується виконати дослідження на розривній машині УММ-5. Отримані дані дозволять порівняти властивості найбільш популярних і схожих за характеристиками філаментів, ABS і CoPET, визначити вплив величини внутрішнього заповнення моделі, характер руйнування.

ABS (Акрилонітрилбутадієнстирол)-пластик є одним з найпопулярніших у світі матеріалів для 3D-друку, тому що він досить міцний і ним відносно легко друкувати. Він може бути використаний для виготовлення функціональних 3D-друкованих деталей і для прототипів. Переваги: ABS – міцний і довговічний матеріал. Володіє хорошою стійкістю до нагрівання та ударів. Матеріал буде жолобитися і гнутися перед тим, як зламатися, довговічність ABS також сприяє його використанню для функціональних деталей. Недоліки: ABS дуже чутливий до змін температури, тому рекомендуються принтери зі столом із підігрівом, а також закритим корпусом.

Коливання температури можуть призвести до деформації та появи тріщин на деталях.

СоРЕТ (Поліетилентерефталат гліколь) являє собою термопластичний матеріал, властивості якого роблять його гарним претендентом на функціональні об'єкти. В традиційному виробництві його часто використовують для виготовлення пляшок для води й харчових контейнерів.

Переваги: СоРЕТ вважається харчовою ниткою, отже можливо використовувати його для виготовлення речей, які будуть стикатися з їжею, наприклад, кухонних приладів, контейнерів і т.п. Матеріал також міцний і володіє високою ударостійкістю.

Недоліки: Філамент СоРЕТ схильний додавати додаткові нитки під час друку, що часто призводить до «волохатих» виробів.

### **3.3 Верстатне обладнання для проведення процесів різання та його характеристики**

Для проведення експериментальних досліджень по визначенню точності та шорсткості після фрезерування та обточування деталей, отриманих 3D-друком, застосовувались верстати, загальний вигляд яких представлено на рис.3.1 та рис. 3.2. У таблиці 3.1 приведено технічні характеристики застосованих верстатів.



Рис. 3.1. Загальний вигляд  
універсального консольно-фрезерного  
верстата Mikron WF-2



Рис. 3.2. Загальний вигляд  
токарно-гвинторізного  
універсального верстата MN-80A

Таблиця 3.1.

## Технічні характеристики верстатів

№ пп	Параметри	Модель верстата та характеристики	Параметри	Модель верстата та характеристики
	1	2	3	4
1	Тип верстата	Універсальний консольно- фрезерний Mikron WF-2	Тип верстата	Токарно- гвинторізний універсальний MN-80A
2	Розміри робочого столу	700 x 250 мм	Відстань між центрами	300 мм
3	Діапазон робочих подач	8-400 мм/хв	Максимальний діаметр оброблення над супортом	80 мм
4	Поздовжній хід (X)	420 мм	Максимальна довжина оброблення	300 мм
5	Поперечний хід (Y)	250 мм	Швидкість обертання шпинделя	150 - 2000 об/хв
6	Вертикальний хід (Z)	345 мм	Хід супорта	100 мм,
7	Швидкість обертання шпинделя	50–2240 об/хв	Потужність двигуна	0,37 кВт
8	Конус шпинделя	ISO 40	Діапазон подач супорта	0,01-0,15 мм/об
9	Потужність приводу	1,8 кВт	Маса	135 кг
10	Маса верстата	770 кг	Габаритні розміри	1170 x 610 x 1310 мм
11	Габаритні розміри	1330 x 1230 x 1560 мм		

### 3.4 Зразки та особливості методів механічного оброблення зразків, отриманих 3D- друком

Для досліджень були вибрані наступні матеріали пластмас: HIPS; CoPET; ABS та виготовлені зразки для оброблення обточуванням.

Зразки виконані з отвором для базування на оправці з метою підвищення геометричної точності поверхонь, що обробляються.

Для проведення дослідження на установці [103] підготовлено пари тіл тертя: призматичний зразок і контртіло у вигляді циліндричної втулки (рис. 3.3). Обрано такі пластики для досліджень: HIPS, CoPET, ABS, виготовлено по два зразки і по два контртіла з кожного досліджуваного пластику.

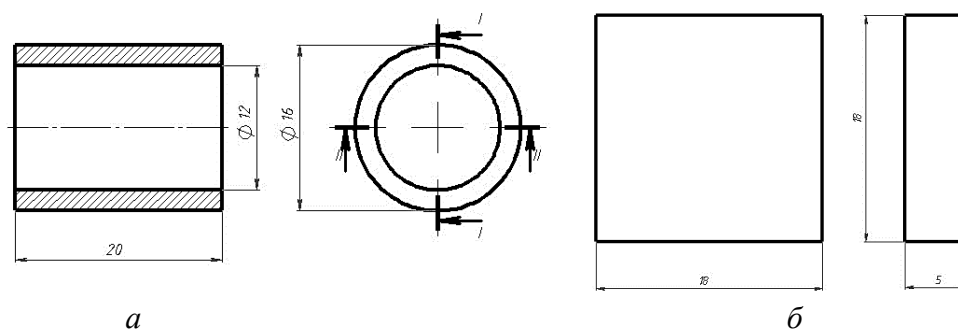


Рис. 3.3 Вигляд та розміри контактуючих пар: *a* – контр тіла; *б* – зразок

Зовнішній вигляд зразків для токарного оброблення з різного виду пластика показано на рис. 3.4.

Перед початком досліджень зразки і контртіла необхідно механічно обробити, щоб усунути дефекти друку. Зразки оброблятимуться методом фрезерування контактної площини, до контртіл буде застосована токарне оброблення.

Зовнішній вигляд контртіл до оброблення показано на рис. 3.4.



*a*



*б*



*в*

Рис. 3.4 Зразки для токарного оброблення з різного виду пластика: *a* – HIPS;  
*б* – CoPET; *в* – ABS

Для базування на токарному верстаті попередньо оброблено центральний отвір розточуванням до розміру 12 мм. (рис. 3.5). Виготовлено спеціальну оправку з поверхнею 12 мм для встановлення зразків, фіксація зразка відбувається гвинтом в торці оправки. Оправка показана рис. 3.6.



Рис 3.5 Попереднє розточування отвору у зразку для базування на оправці



Рис. 3.6 Оправка для встановлення зразків закріплена в трикулачковому патроні

Чистове обточування зразків проводилось при однакових режимах різання, інструмент – прохідна пластина APMT113508PDER. Оберти – 1100об/хв. Подача – 0,06мм/об. Швидкість різання 56 м/хв. Глибина різання 0,1мм. Процес зовнішнього обточування показано на рис. 3.7. Заготовки гарно піддаються токарному обробленню, стружка формується, нагрів заготовки в



процесі оброблення – мінімальний і не призводить до деформацій. Візуально оброблені зразки мають різну шорсткість обробленої поверхні.

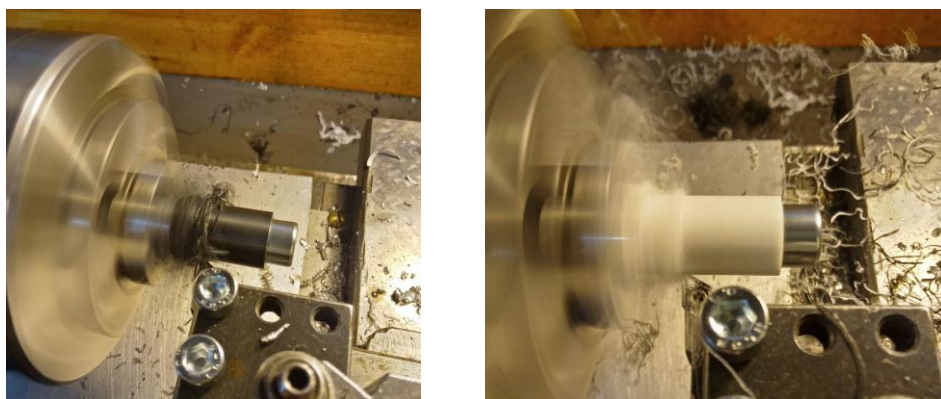


Рис. 3.7 Процес зовнішнього обточування зразків з різних матеріалів

Для фіксації результатів оброблення, а також оцінки циліндричності виконано заміри оброблених циліндричних поверхонь мікрометром МКЦ 0-25 ДСТУ 33.2-30291682-002-2004. Вимірювався кожен зразок в двох взаємоперпендикулярних площинах.

Результат замірів шорсткості контртіл до механічного оброблення (після FDM друку) та після оброблення занесено в таблиці 3.2 та 3.3.

Таблиця 3.2

Результат замірів шорсткості контртіл до механічного оброблення

Матеріал	CoPet		ABS+		HIPS	
№ контртіла	№1	№2	№1	№2	№1	№2
Ra, мкм	12,327	12,965	9,627	9,742	11,228	11,361
	12,134	13,156	9,468	10,125	10,985	11,445
	12,058	12,876	10,144	10,070	11,094	10,896

Таблиця 3.3

Результат замірів шорсткості контртіл після механічного оброблення

Матеріал	CoPet		ABS+		HIPS	
№ контртіла	№1	№2	№1	№2	№1	№2
Ra, мкм	2,019	2,096	1,616	2,742	1,218	1,761
	2,074	2,253	0,603	2,825	1,145	0,814
	2,043	2,023	0,724	2,590	1,394	1,594

### 3.5 Конструктивні особливості та вибір матеріалу різального інструменту для проведення експериментальних досліджень

Для проведення експериментів було обрано чотири види кінцевих фрез, які відрізняються матеріалом різальної частини, геометрією, кількістю різальних зубців, покриттями. (рис. 3.8). Також використовувались три види пластинок для торцевої фрези.



Рис. 3.8 Кінцеві фрези різної конструкції та поверхневим покриттям

Для оброблення площин зразків використано торцеву фрезу із корпусом PE01.11B32.100.10 та пластинки типу APMT 1135 рис. 3.9).



Рис. 3.9 Змінні пластинки для встановлення у корпусі торцевої фрези PE01.11B32.100.10

Параметри різальних інструментів та змінних пластин занесене у табл. 3.4 та табл.3.5.

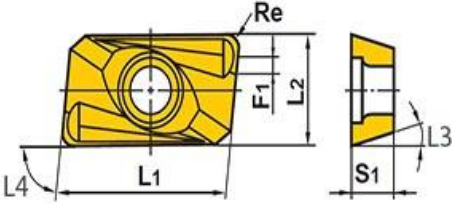
Таблиця 3.4

## Параметри різальних інструментів та змінних пластин

							
№ інструмента	d – діаметр хвостовика, мм	D – діаметр робочої частини, мм	L – довжина загальна, мм	l – довжина робоча, мм	$\omega$ – кут підйому гвинтової лінії, град	z – кількість різальних 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 3.5

## Характеристики змінних пластинок

		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		
№ 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

Оброблення проводилось на вертикально-фрезерувальному верстаті MIKRON WF-2. Загалом охолоджуючі рідини не потрібно застосовувати для оброблення більшості термопластичних матеріалів.

### 3.6 Обладнання для дослідження характеристик міцності деталей, отриманих за допомогою FDM- друку із ABS та CoPET пластику

Однією з характеристик комплексу параметрів технологічного забезпечення якості деталей машин, отриманих 3D-друком, є параметр міцності матеріалу до навантажень.

Для проведення дослідження використано розривну машину УММ-5 (рис. 3.10) основні характеристики: точність вимірювань, % від вимірюваного навантаження  $\pm 1$ ; найбільше статичне навантаження на розтяг, стиснення, поперечний вигин та загин – 50 кН; кількість швидкостей навантаження – 5; швидкість навантаження – 2; 4; 10; 20; 50, мм/хв.; кількість швидкостей холостого ходу – 1 мм/хв на поперечний вигин – 68 мм.



Рис. 3.10 Розривна машина УММ-5



Рис. 3.11 Фіксація зразка в оснащенні машини УММ-5

Для можливості закріплення досліджуваного зразка на машині підготовлено зразки спеціальної форми, які показано на рис. 3.12. Упори на кінцях дозволяють надійно зафіксувати зразок в оснащенні машини (рис. 3.11). Потоншення по центру – формує досліджуваний переріз площею  $0,0004 \text{ м}^2$ .

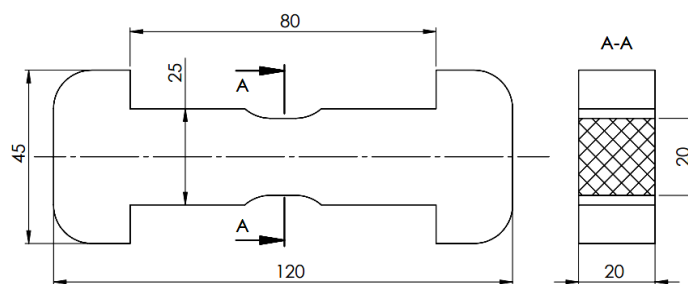
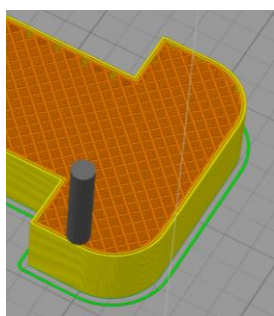


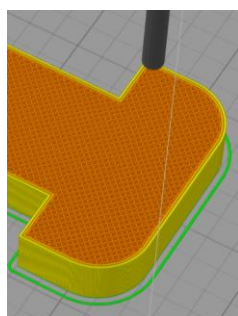
Рис. 3.12 Ескіз зразка виготовлено на FDM принтері

Зразки виготовлено на FDM-принтері Artillery sidewinder x1, діаметр сопла – 0,4 мм. Режими друку для зразків з CoPet: температура сопла – 245°C; температура столу – 90°C; висота шару – 0,25 мм; швидкість друку – 75 мм/с; кількість зовнішніх шарів – 2. Режими друку для зразків з ABS: температура сопла – 230°C; температура столу – 110°C; висота шару – 0,25 мм; швидкість друку – 80 мм/с; кількість зовнішніх шарів – 2.

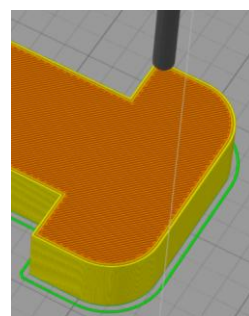
Зразки (рис. 3.13) надруковано з кожного матеріалу в трьох варіантах із різним заповненням: 100%, 50%, 25% заповнення, тип заповнення – Rectilinear (шари накладаються з перехреснуванням в 90°).



*a*



*б*



*в*

Рис. 3.13 Внутрішня структура досліджуваних зразків при заповненні:

*a* – заповнення 25%; *б* – заповнення 50%; *в* – 1 заповнення 100%

Зразки почергово закріплюються в розривній машині і навантажуються до руйнування. За результатами дослідження формуються діаграми руйнувань для всіх зразків.

### 3.7 Установка для випробувань на зносостійкість

Для кількісної оцінки величини зношування, а також для вибору оптимальних пар тертя, при контакті тіла та контртіла, виготовлених з різних пластиків, а також пар пластик-метал, виготовлено експериментальну установку для випробувань на зносостійкість для різних швидкостей ковзання, а також з регульованим тиском в зоні контакту досліджуваних тіл [103].

Установка для випробувань на зносостійкість (рис. 3.14) монтується на лабораторному столі 1 і включає регульований електропривід 2, шпиндельну головку 3. На правому кінці вала головки закріплюється контртіло досліджуваної пари тертя у вигляді диска 4, а на лівому кінці вала розміщується блок шківів з діаметрами  $68 \times 76 \times 85 \times 95$  мм і тахометр.

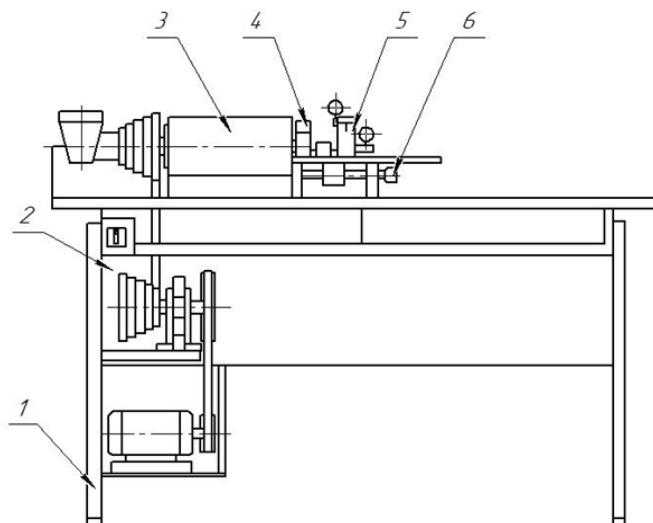


Рис. 3.14. Схема установки: 1 – лабораторний стіл; 2 – регульований електропривід; 3 – шпиндельна головка; 4 – диск; 5 – притискний вузол; 6 – гвинт

На циліндричних направляючих встановлена каретка 5 з навантажувальним пристроєм (рис. 3.15), каретка переміщається в зону тертя ходовим гвинтом 6.

Лінійна швидкість ковзання в зоні контакту контртіла і зразка досліджуваного матеріалу визначається за формулою:

$$V_k = \pi D n / 1000, \text{ м/с}, \quad (3.1)$$

де  $D$  – діаметр контртіла;

$n$  – частота обертання контртіла, об/хв.

Навантажувальний пристрій (рис. 3.15) призначений для створення регульованого тиску у зоні контакту контртіла  $1$  і поверхнею зразка  $2$  досліджуваного матеріалу. Заданий тиск створюється тарованою пружиною  $3$ , розміщеною в корпусі  $4$ , з можливістю стискання гвинтом  $5$ . Торці пружини опираються на напрямні вставки  $8$ , до верхньої вставки прикріплена упорна планка  $6$ , призначена для фіксації ступеню стискання пружини, що вимірюється індикатором переміщень  $7$  з ціною поділки  $0,01$  мм, прикріпленим до кришки корпусу  $4$ . Жорсткість тарованої пружини  $3$  складає  $30$  Н/мм. Максимальна сила притискання  $30$  Н створюється стисканням пружини  $3$  на  $9$  мм.

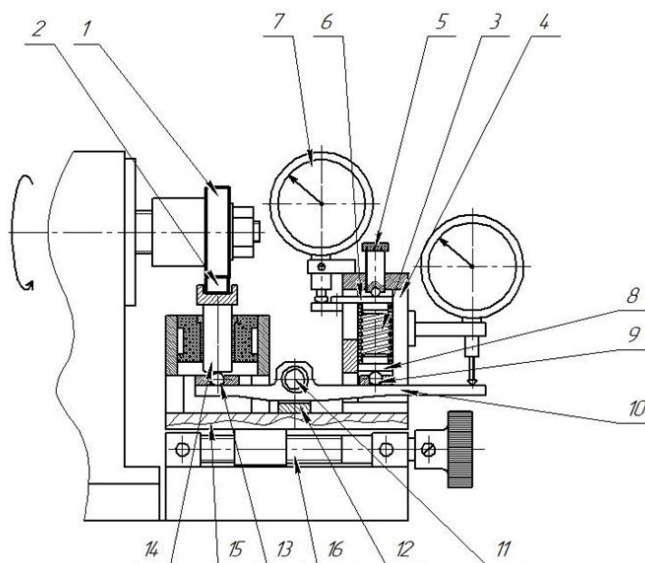


Рис. 3.15 Навантажувальний пристрій:  $1$  – контртіло;  $2$  – поверхня зразка;  $3$  – тарована пружина;  $4$  – корпус;  $5$  – гвинт;  $6$  – упорна планка;  $7$  – індикатор переміщень;  $8$  – нижня напрямна вставка;  $9, 13$  – кульки;  $10$  – важіль;  $11$  – вісь;  $12$  – опора;  $14$  – тримач;  $15$  – каретка;  $16$  – ходовий гвинт

Через те, що контактні частини приладу та досліджуваного матеріалу стираються, важіль  $10$  під дією пружини  $3$  повертається. Його правий кінець



опускається, і це показує індикатор з точністю до 0,01 мм. Таким чином можна виміряти, наскільки зносилися контактні поверхні.

Робота на установці передбачає такі дії:

- на вал шпиндельної голівки встановлюється і закріплюється контртіло;
- в паз тримача вставляється і закріплюється зразок досліджуваного матеріалу;
- каретку переміщують ліворуч ходовим гвинтом до співпадання осі зразка з серединою контртіла ;
- індикатор виставлюється на «нуль» контактного тиску і гвинтом стискається пружина залежно від сили притискання зразка до поверхні контртіла;
- індикатор лінійного зношування виставляється на «нуль» контактних поверхонь зразка і контртіла;
- перевстановити клинопасові передачі згідно зі ступенем передачі електроприводу, що відповідає заданій дослідом лінійній швидкості ковзання в зоні контакту контртіла і зразка досліджуваного матеріалу;
- індикатор для вимірювання сили тертя поверхонь зразка і контртіла виставити на «нуль»;
- запустити електропривод для продовження роботи установки протягом визначеного експериментом часу. Під час роботи фіксувати значення сили тертя та лінійного зношування за показаннями відповідних індикаторів.
- після закінчення експерименту зняти навантаження з пружини та перемістити каретку на 50 мм праворуч за допомогою ходового гвинта.;

Застосування експериментальної установки (рис. 3.16) дозволяє краще оцінити експлуатаційні властивості пластиків, які застосовуються в 3D-друці, спрогнозувати довговічність деталей, створених за цією технологією.



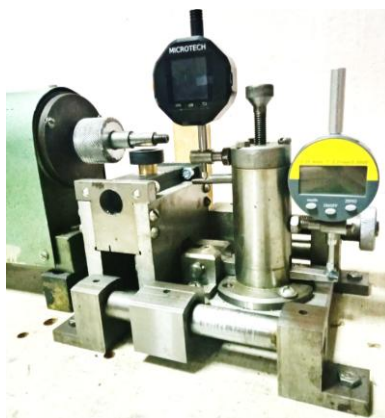


Рис. 3.16 Загальний вигляд експериментальної установки

Підготовлені зразки і контртіла фіксуються на установці (рис. 3.17) для проведення досліджень, для досліджень обрано такі пари (зразок/контртіло): CoPET/ABS; CoPET/HIPS; ABS/HIPS; ABS/CoPET; HIPS/ CoPET; HIPS/ABS.



Рис. 3.17. Вигляд закріплених зразка і контртіла

### **3.8 Прилади та обладнання для контролю розмірів та шорсткості поверхонь деталей**

Для вимірювання точності виготовлення відповідальних поверхонь застосовувався мікрометр гладкий МКЦ 0-25, ТУ У 33.2-30291682-002-2004. Перед вимірюваннями виконано перевірку приладу за допомогою кінцевих мір довжини ДСТУ ГОСТ 8.367:2009 (рис. 3.18, а). Процес вимірювання показано на рис. 3.18,б.



*a*



*б*

Рис. 3.18. Вимірювальний прилад – Мікрометр гладкий МКЦ 0-25, ДСТУ 33.2-30291682-002-2004: *a* – перевірка приладу кінцевими плитками, *б* – процес вимірювання

Таблиця 3.6

Технічна характеристика мікрометра гладкого МКЦ 0-25

Параметр	Значення
Країна виробник	Україна
Діапазон вимірювання ,мм	0-25
Похибка, мм	$\pm 0,002$
Дискретність відліку ,мм	0,001
Вивід даних	RS-232
Захист IP	IP-65
Індикація	Цифрова
Мікрогвинт	Поворотний
Країна виробник	Україна
Діапазон вимірювання ,мм	0-25

Для визначення параметру шорсткості поверхонь, як важливої експлуатаційної характеристики і порівняння її після оброблення з вихідною шорсткістю для різних матеріалів, використано прилад Mahr MarSurf PS 10 (рис. 3.19).



Рис. 3.19 Прилад для вимірювання шорсткості Mahr MarSurf PS 10

Після проведення експериментальних досліджень на зношування зразків проводиться оцінка величини кількісного зношування на обладнанні (рис. 3.20).



Рис. 3.20. Установка для вимірювання величини зношування зразків з пластмасових матеріалів: HIPS; CoPet; ABS

### 3.9 Методологія оптимізації конструкції деталей машин для ефективного адитивного виробництва за допомогою Solidworks Simulation

За допомогою адитивних технологій значно вдосконалились процеси створення конструкцій складної форми з меншою вагою і ефективнішим використанням матеріалу. 3D-друк знімає багато обмежень щодо форми виробу, які присутні, наприклад, при механічному обробленні деталей на верстатах. Для ефективного моделювання деталей в CAD-системах можуть допомогти методи генеративного (топонімічного) проєктування. На основі визначених обмежень можна оптимізувати форму виробу, зберігши міцнісні характеристики обмеживши масу.

Система SOLIDWORKS в додатку Simulation включає інструменти дослідження топології (Topology Optimization), що працює на принципах генеративного дизайну. Пропонується, використовуючи вказаний інструмент, оптимізувати форму деталі «Кронштейн» знизивши масу, зменшивши час виготовлення, але при цьому зберегти достатню міцність, при заданих умовах навантаження.

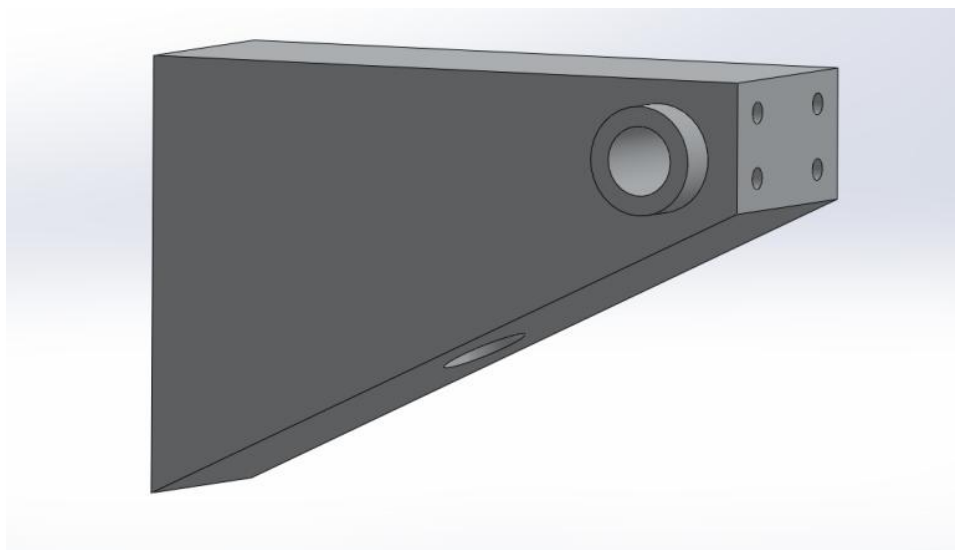


Рис. 3.21 3D-модель деталі «Кронштейн», яка підлягає оптимізації

### **3.10 Модернізація конструкції поворотного стола для розширення технологічних можливостей верстатів з ЧПК**

Одним із шляхів зменшення собівартості виготовлення виробів та підвищення точності оброблення на обладнанні з ЧПК для малих підприємств є модернізація поворотних столів (рис. 3.22) шляхом заміни ручного приводу на механізований, пов'язаний з комп'ютерною програмою верстата ЧПК.

Для інтеграції модернізованого стола в систему металорізального верстата з ЧПК необхідною є функція зчитування команд, надісланих зі стійки управління верстатом, і перетворювання команд в сигнали напрямку (DIR) та кроку (PULSE). Для вирішення цієї задачі запропоновано використання програмованого логічного контролера (PLC).



Рис. 3.22 Загальний вигляд поворотного стола із ручним приводом, що підлягає модернізації

### **3.11 Оброблення експериментальних даних та оцінка точності отриманих результатів**

Для зменшення похибок перед основними вимірюваннями проводили контрольні заміри для мінімізації випадкових помилок. Щоб уникнути систематичних помилок, усі вимірювальні прилади пройшли перевірку та калібрування. Основні дослідження були однофакторними, тобто під час

кожного досліджу змінювали лише один параметр, залишаючи інші незмінними. Відповідно до рекомендацій [104, 105], було проведено не менше п'яти основних дослідів. Ділянки перегину на кривих досліджувалися додатково п'ятьма дослідями. Для обробки отриманих даних застосовувалися методи математичної статистики, зокрема визначалося середнє арифметичне значення вимірювань:

$$\bar{X}_k = \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^n x_{k,i}, \quad (3.2)$$

де  $n$  – кількість вимірювань;

$x_{k,i}$  – результат  $i$ -го виміру  $k$ -ї серії вимірів.

Вважається, що середнє значення є наближенням дійсного значення, оскільки випадкові похибки, що мають протилежні знаки, взаємно нівелюються. Збільшення кількості вимірювань підвищує точність цього припущення.

Абсолютна похибка вимірювання розраховувалася за формулою:

$$\Delta X_i = X_{k,i} - \bar{X}_k. \quad (3.3)$$

Стандартне відхилення показує, наскільки експериментальні дані можуть відрізнитися від справжнього значення через випадкові помилки, і визначалося за формулою:

$$S_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta X_i^2}{n_k - 1}}. \quad (3.4)$$

Для об'єднання результатів усіх  $k$  серій вимірювань використовувалося повне стандартне відхилення, яке розраховувалося за такою формулою:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^k (S_k^2 (n_k - 1))}{\sum_1^k (n_k - 1)}}. \quad (3.5)$$

Графіки залежностей між досліджуваними параметрами будувалися на основі середніх значень, отриманих у кожній серії експериментів.

## **РОЗДІЛ 4**

### **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ, ТОЧНОСТІ ТА ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ, ПАРАМЕТРІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВЕРСТАТНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ЧПК І МЕТОДОЛОГІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ОТРИМАНИХ 3D-ДРУКОМ**

#### **4.1 Дослідження впливу параметрів інструменту та режимів різання на точність оброблення деталей отриманих FDM друком**

У наш час машинобудівна продукція стає все більш складною та вимагає виконання більшої кількості завдань на етапах проєктування та виготовлення. Зокрема, геометрично складні конструкції існують у різних машинах та механізмах, таких як верстатобудування, авіабудування та автомобілебудування. 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 [106]. За останні кілька років були зроблені машини FDM, які можуть виготовляти вироби з високою точністю та меншою похибкою [107]. 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 [31]. 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 різального інструменту та параметрів різання при фрезеруванні деталей з CoPET. Вибір інструменту та налаштування параметрів може суттєво впливати на продуктивність, ефективність оброблення і якість кінцевого виробу. Хоча існують різні типи різальних 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 дослідження було визначення впливу параметрів різального інструменту, типу його покриття та режимів різання на точність і шорсткість оброблених поверхонь деталей отриманих FDM друком.

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 різальних інструментів, щоб оцінити їх ефективність при обробленні деталей із CoPET.

Для проведення експериментів було обрано чотири види кінцевих фрез, що відрізняються матеріалом різальної частини, геометрією, кількістю різальних зубців, покриттями. Також три види пластинок для торцевої фрези (див. розділ 3). У якості заготовки обрано надруковану прямокутну пластину з CoPet без внутрішніх пустот фрези (див. розділ 3).

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 – 0,25 мм; швидкість друку – 75 мм/с; кількість зовнішніх шарів – 2. Тип заповнення – Rectilinear 100 % (шари накладались з перехрещуванням в 90°).

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 (рис. 4.1, рис. 4.2)

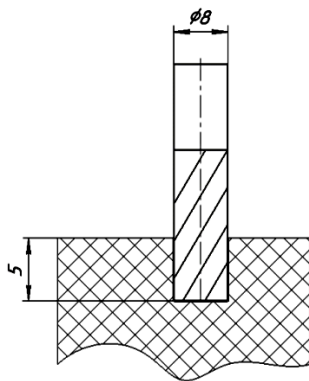


Рис. 4.1. Схема оброблення – паз

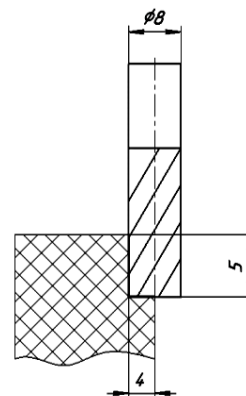


Рис. 4.2. Схема оброблення – уступ

Механічне оброблення проводилося 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  $\varnothing 8\text{мм}$  – 1125об/хв.; подача – 250 мм/хв; швидкість різання – 28 м/хв.

Фрезерування виконувалось кожним інструментом відкритого пазу та уступу, результати занесені до таблиць 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1

Результати оброблення відкритого пазу

№	Інструмент	Зовнішній вигляд	Отриманий розмір, мм	Інструмент	Зовнішній вигляд	Отриманий розмір, мм
1	№1		7,95	№2		7,99
						
2	№3		8,00	№4		8,01
						

Таблиця 4.2

Результати оброблення уступу

№	Інструмент	Зовнішній вигляд	Отриманий розмір, мм	Інструмент	Зовнішній вигляд	Отриманий розмір, мм
1	№1		3,98	№2		3,95
						
2	№3		3,95	№4		3,96
						

Найкращий результат оброблення було досягнуто при використанні фрези з твердого сплаву з полірованою поверхнею, частково придатним також

виявився інструмент зі швидкорізальної сталі HSS. Процес різання досліджувався при різних обертах і подачах для визначення оптимальних режимів різання. Наступним етапом дослідження було оброблення уступу: перекриття – 50%; глибина різання – 5мм.

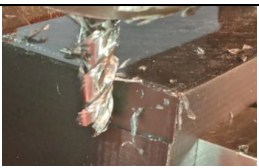










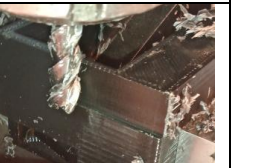
Найкращі результати за такими параметрами як чистота поверхні, відсутність налипання стружки на інструмент та заготовку, значення отриманого розміру, досягнуто при використанні фрези №1.

Для уточнення оптимальних обертів шпинделя і подачі виконано серію дослідів із використанням таких режимів: оберти шпинделя, об/хв. – 400, 800, 1600, 2240; подача, мм/хв. – 125, 250, 400. Результати наведені в таблиці 4.3.

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; швидкість різання – 56м\хв; подача - 400 мм/хв.

Таблиця 4.3

#### Результати оброблення уступу

№	Подача мм/хв	Оберти фрези, об/хв Швидкість різання, м\хв			
		400	800	1600	2240
		10	20	40	56
1	125				
2	250				
3	400				

Наступним етапом було дослідження оброблення площини збірною фрезою із змінними пластинками. Механічне оброблення проводилось на вертикально-фрезерувальному верстаті MIKRON WF-2, використано торцеву фрезу Ø63 мм, із 4-ма пластинками, закріплення фрези – оправка Ø22 мм, закріплення заготовки – у лещатах. Для оцінки процесу обрано середні значення режимів: оберти фрези Ø63 мм. – 800 об/хв.; подача – 250 мм/хв. Виконано фрезерування кожним видом пластинок та результати занесені до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Результати дослідження фрезерування площини торцевою фрезою зі змінними пластинками

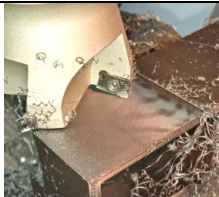

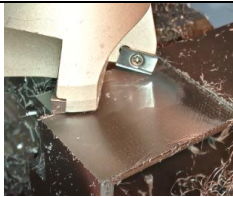





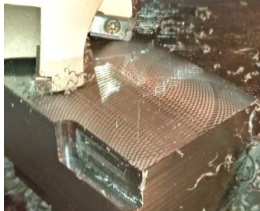
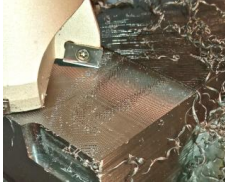


№	Ви пластинки	Зовнішній вигляд поверхні
№1		
№2		
№3		

Найкращі результати за такими параметрами як: чистота поверхні, відсутність налипання стружки на інструмент та заготовку, досягнуто при використанні пластинок №3 (APKT1135PDFR-MA). 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 4.5.



Таблиця 4.5

Результати оброблення пластинками №3 (APKT1135PDFR-MA) на різних режимах

№	Подача, мм/хв	Оберти фрези, об/хв. Швидкість різання, м\хв.			
		400 79,5	800 159	1600 318	2240 445,5
1	125				
2	250				
3	400				

Для визначення впливу режимів різання на шорсткість поверхні додатково оброблено 12 зразків на різних режимах різання двома інструментами, які показали найкращі результати в попередніх дослідях: фреза  $\varnothing 63$  з пластиною APKT1135PDFR-MA (табл. 4.6) та кінцева фреза  $\varnothing 8$  № 1 (табл. 4.7)

Таблиця 4.6

Показники шорсткості після оброблення фрезою  $\varnothing 63$  на різних режимах

№ зразка	Оберти фрези, об/хв.	Швидкість різання, м\хв	Подача, мм/хв.	Шорсткість Ra, мкм
1	3000	593,5	1000	1,632
2	5000	986,5	1000	5,317
3	6500	1285	1000	2,799
4	8000	1581	1000	4,978
5	3000	593,5	2000	3,338
6	5000	986,5	2000	8,430
7	6500	1285	2000	7,882
8	8000	1581	2000	6,336
9	3000	593,5	3000	6,173
10	5000	986,5	3000	2,725
11	6500	1285	3000	2,154
12	8000	1581	3000	2,255

Таблиця 4.7

Показники шорсткості після оброблення фрезою  $\varnothing 8$  на різних режимах

№ зразка	Оберти фрези, об/хв.	Швидкість різання, м\хв	Подача, мм/хв.	Шорсткість Ra, мкм
1	5000	125,5	2000	1,823
2	6000	150	2000	3,870
3	7000	176	2000	0,588
4	8000	201	2000	11,012
5	5000	125,5	5000	0,549
6	6000	150	5000	0,491
7	7000	176	5000	6,506
8	8000	201	5000	2,199
9	5000	125,5	10000	1,407
10	6000	150	10000	0,901
11	7000	176	10000	0,712
12	8000	201	10000	0,495

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; швидкості різання – 56 м\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; швидкості різання – 318 м\хв. та подачі – 125 мм/хв. [108-110].

#### **4.2 Дослідження параметрів точності та шорсткості для реальної деталі «Робоче колесо», виготовленої 3D- друком**

Для проведення досліджень було вибрано деталь складної форми «Робоче колесо» (рис. 4.3) та за допомогою механічного оброблення різанням (токарне, фрезерне) оброблено приєднувальні поверхні, для яких точність після друку є недостатньою.

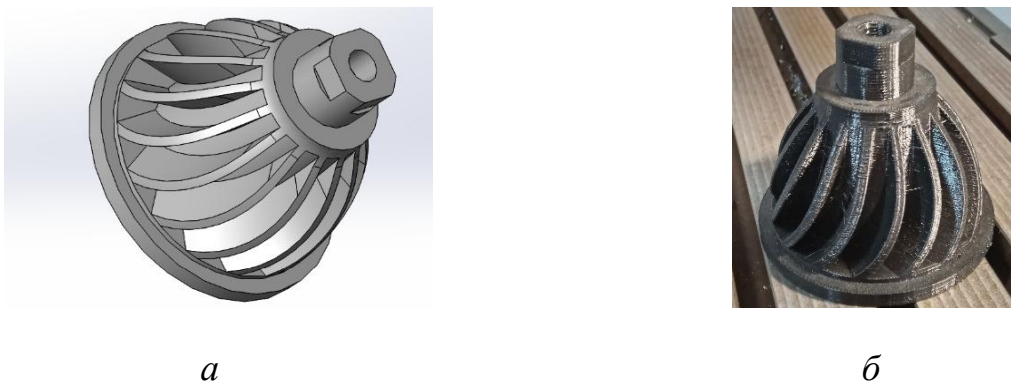


Рис. 4.3 Загальний вигляд деталі: *а* – 3D-модель; *б* – деталь надрукована 3D-друком без оброблення



Після друку проведено заміри приєднувальних поверхонь згідно зі схемою, показаною на рис. 4.4, латинськими літерами позначено поверхні, які контролюється, римськими цифрами – перерізи, в яких проведено вимірювання кожної поверхні. Вимірювання здійснюються за допомогою штангенциркуля ШЦЦ-150 згідно з ДСТУ 166:2009.

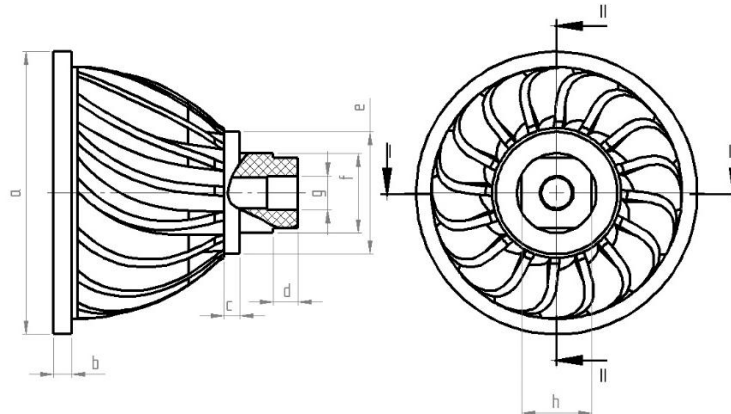


Рис. 4.4 Схема вимірювань

Порядок оброблення заготовки наступний: проводиться токарне оброблення поверхні  $a$ , обточування торця, формування чистового розміру  $b$ . Базування проводиться в трикулачковому патроні на необроблену поверхню  $f$ , що виступає чорною базою. Чистове обточування поверхонь  $f$  та  $e$ , підрізка торців, базування в трикулачковий патрон в упор оберненими кулачками на оброблену поверхню (рис. 4.6).



$a$

Рис. 4.5 Підрізка торця  $b$



$b$

Рис. 4.6 Чистове обточування  
поверхонь  $f$  та  $e$

Наступний перехід – фрезерування квадрату у розмір  $h$  проводиться з установкою заготовки торцем на стіл фрезерного верстату при фіксації прихватами через Т-подібні болти (рис. 4.7).



Рис. 4.7 Фрезерування лисок  $h$

Заміряні величини до та після механічного оброблення занесені до таблиць 4.8 та 4.9.

Таблиця 4.8

Величина відповідальних розмірів до механічного оброблення

Переріз, в якому здійснюється вимірювання	Заміряні величини, мм							
	a	b	c	d	G	f	e	h
I	91,48	6,28	5,67	8,07	9,65	25,61	40,88	22,84
II	91,33	6,24	5,55	8,10	9,93	25,75	40,58	22,70

Вимірювання показали значну відмінність розмірів в двох перпендикулярних перерізах, також на поверхнях присутні нерівності та напливи утворені в процесі друку, такі дефекти не дозволяють використовувати деталь за призначенням. Пропонується виконати механічне оброблення відповідальних поверхонь методом обточування і фрезерування.

Таблиця 4.9

Величина відповідальних розмірів після механічного оброблення

Переріз в якому здійснюється вимірювання	Заміряні величини, мм							
	a	b	c	d	G	f	e	h
I	88,98	3,92	4,96	10,01	10,99	24,43	39,49	21,89
II	88,97	3,90	4,97	9,94	10,97	24,45	39,48	21,91

Результати проведених досліджень (табл. 4.9) показали, що після механічного оброблення відповідальних поверхонь з урахуванням впливу пружних відтискань поверхні, що оброблялась, було отримано більшу точність розмірів з відхиленнями до 0,02 мм, що не перевершує допуску на дану поверхню [111].

#### **4.3 Дослідження зношування пар тертя, отриманих за допомогою FDM- друку із ABS та CoPET пластику**

Підготовлені зразки і контртіла фіксуються на установці для проведення досліджень. Для досліджень обрано такі пари (зразок/контртіло): CoPET/ABS; CoPET/HIPS; ABS/HIPS; ABS/CoPET; HIPS/CoPET; HIPS/ABS.

Дослідження і роботу на установці (див. розділ 3) проведено згідно з порядком, описаним в розділі 3, з метою скорочення часу проведення досліджень мащення поверхонь не використовувалося, результати зношування зафіксовано на вимірювальному стенді (див. розділ 3) і занесено в таблицю 4.10. Режими проведення дослідів: оберти контртіла – 540 об/хв; тиск в зоні контакту – 10 Н; час тертя – 5 хв; шлях тертя – 135,64 м.

На рис. 4.8 показано вид зношування поверхні досліджуваних зразків: Зразок №1 – CoPET/ABS; Зразок №2 – CoPET/HIPS; Зразок №3 – ABS/HIPS; Зразок №4 – ABS/CoPET; Зразок №5 – HIPS/CoPET; Зразок №6 – HIPS/ABS.

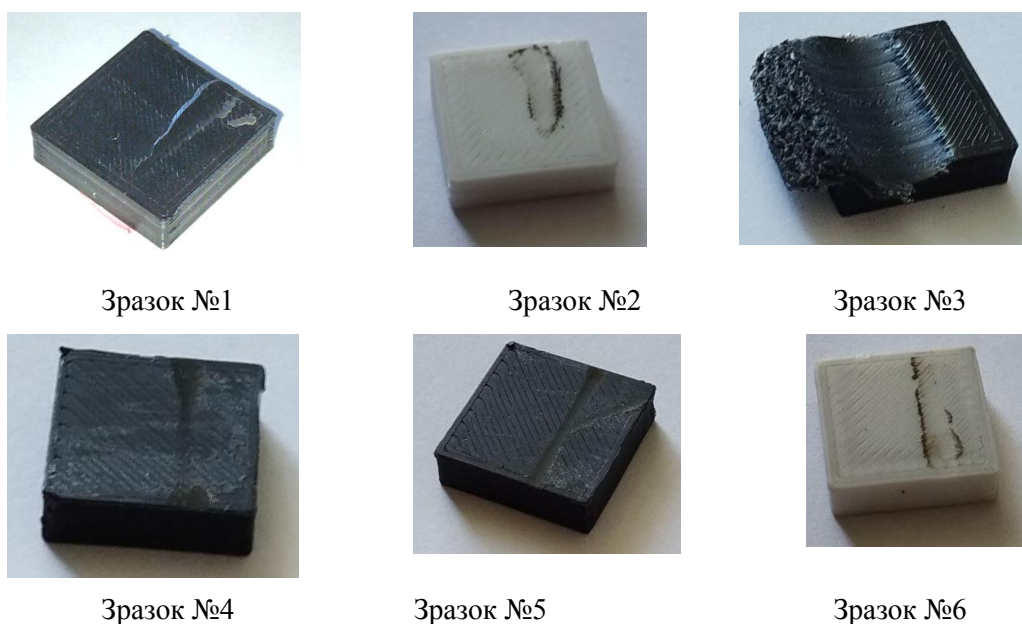


Рис. 4.8. Вигляд зразків після проведення досліджень

Таблиця 4.10

Результати дослідження величини зношування пар тертя

Пара тертя (зразок/контргіло)	№ зразка	Тиск в зоні контакту, Н	Час тертя, хв	Величина зносу зразка, мкм
CoPET/ ABS	1	10	5	60
HIPS/ABS	2	10	5	80
CoPET/HIPS	3	10	4	1310
ABS/ HIPS	4	10	5	40
ABS/CoPET	5	10	5	30
HIPS/ CoPET	6	10	5	90

Дослідження показало непридатність застосування пари тертя з матеріалів CoPET та HIPS тому, що дослід було зупинено передчасно, оскільки відбулось значне руйнування зразка (рис. 4.9), що супроводжувалось виділенням тепла та злипання зразка і контргіла.



Рис. 4.9. Вигляд оплавленого зразка №3

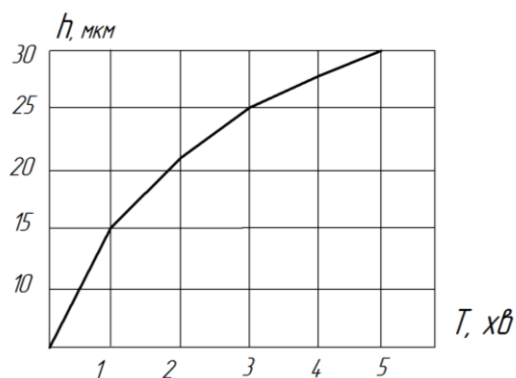


Рис. 4.10. Залежність величини зношування зразка №5 за часом

Інші пари тертя показали свою працездатність та потенційну придатність для використання у виготовленні деталей машин, що в процесі експлуатації взаємодіють тертям ковзанням, а саме: зубчасті передачі, вкладиші, кулісні механізми.

Найкращий результат було отримано в парі матеріалів ABS (зразок) та CoPET (контртіло), величина зношування складала 30 мкм, що робить таку пару тертя найбільш оптимальним вибором серед пар, що досліджувались.

#### **4.4 Дослідження температурного впливу режимів різання на поверхню заготовки у процесі обточування**

Тепло при різанні змінює властивості оброблюваного матеріалу.

Враховуючи, що термостійкість більшості конструкційних пластмас не перевищує 290°C, оброблення термопластів при температурі від 60 до 90°C призведе до розплавлення оброблюваної поверхні і налипання стружки на інструмент. Це призводить до шорсткості обробленої поверхні, задирок, спотворення форми і розмірів, а в деяких випадках різання стає неможливим. На тепловміст і середню температуру стружки сильно впливають глибина різання, подача і швидкість різання. Під час різання частка тепла, що розсіюється в стружці, збільшується зі збільшенням швидкості різання. Це означає, що температура може перевищувати температуру плавлення оброблюваного матеріалу. Найвища температура в зоні різання – це поверхня контакту між стружкою і передньою поверхнею інструменту. При обробленні полімерних композитів рекомендується високошвидкісне оброблення на низьких подачах для отримання максимальної продуктивності оброблення при мінімальних температурах різання, а використання рідинного охолодження не рекомендується через проковзування інструменту по оброблюваній поверхні. Для визначення впливу умов різання на температуру зони різання між різцем і заготовкою при токарній обробленні було проведено експериментальне дослідження з вимірювання температури зони різання за допомогою тепловізійної камери НТІ НТ-03.

У ході експерименту відеозображення, отримані з тепловізійної камери, зберігалися у вигляді окремих зображень. На рис. 4.11 показано відеозображення тепературної картини обладнання із заготовкою до процесу оброблення обточуванням, що становить 25,8°C.

Далі в процесі дослідження температурних полів в зоні різання було виміряно залежність температури в зоні різання при рекомендованих режимах різання  $n = 900$  об/хв. подачі  $S = 0,15$  мм/об. від глибини різання для матеріалу CoPet, що особливе значення має при чорнових видах оброблення з отриманням максимальної продуктивності оброблення (рис. 4.12, рис. 4.13, рис. 4.14).

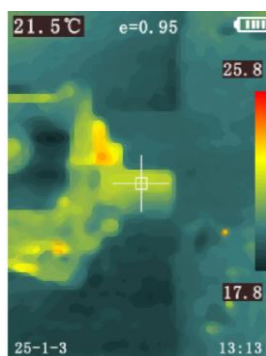


Рис. 4.11. Температура обладнання із заготовкою до процесу оброблення обточуванням

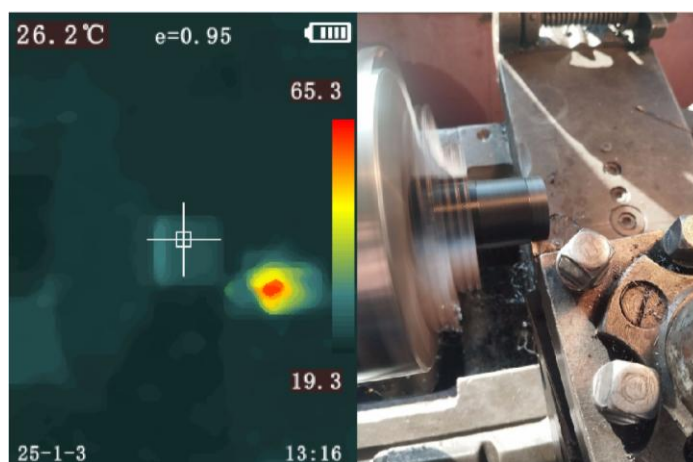


Рис. 4.12. Температура в зоні оброблення обточуванням заготовки з пластмаси при: обертах  $n = 900$  об/хв; подачі  $S = 0,15$  мм/об.;  $t = 1$  мм

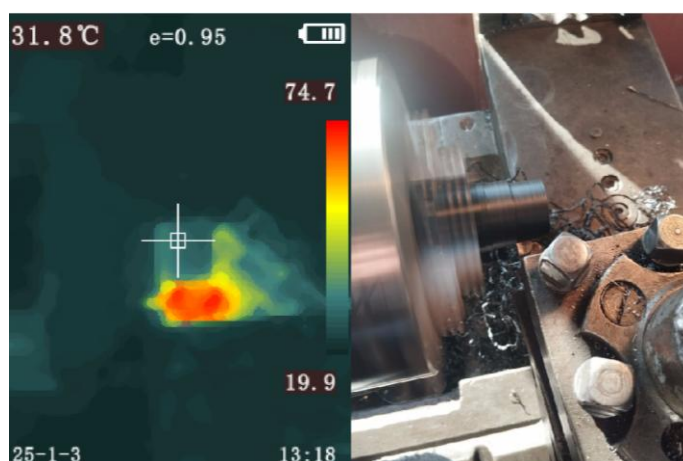


Рис. 4.13. Температура в зоні оброблення обточуванням заготовки з пластмаси при: обертах  $n = 900$  об/хв ; подачі  $S = 0,15$  мм/об;  $t = 2$  мм



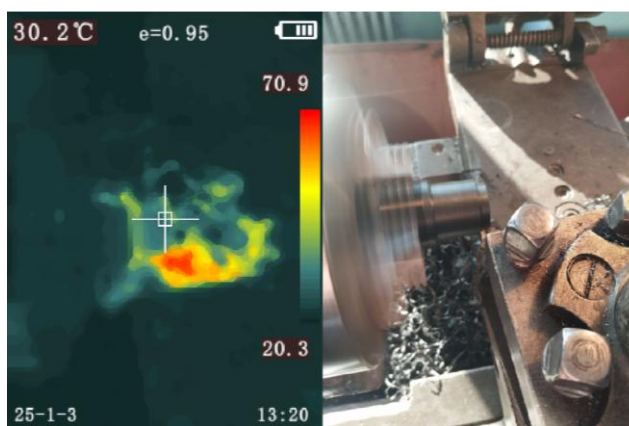


Рис. 4.14. Температура в зоні оброблення обточуванням заготовки з пластмаси при: обертах  $n = 900$  об/хв; подачі  $S = 0,15$  мм/об.;  $t = 3$  мм

Встановлено, що при рекомендованих режах різання при чорновому обточуванні плластмас з CoPet (температура, при якій пластик починає розм'якшуватися становить  $90^{\circ}\text{C}$ ) із глибиною різання  $t = 3$  мм температура в зоні різання не перевищує  $70,9^{\circ}\text{C}$ , що говорить про непорушення поверхневого шару поверхні при необхідній шорсткості і досягнення необхідної продуктивності процесу оброблення.

#### **4.5 Дослідження характеристик міцності деталей, отриманих за допомогою FDM-друку із ABS та CoPET пластику**

Дотепер багато вчених досліджували вплив параметрів технологічного процесу на механічні властивості виробів, виготовлених за технологією FDM [112, 113]. Деякі дослідники зосереджувалися на оптимізації обраного параметра у відношенні до певного критерію оцінки, наприклад, часу процесу [114], точності зображення форми [115], якості поверхні та механічних властивостей. Деталі, отримані на принтерах, використовуються як ремонтні запасні частини, у якості прототипів, а також як повноцінні функціональні деталі в механізмах. Технологія FDM-друку значно спрощує процес виготовлення деталей складної форми, а постоброблення, в тому числі



оброблення різанням на верстатах, забезпечує достатню точність. При цьому залишається актуальним питання механічних властивостей виробу, оскільки процес друку передбачає пошарове наплавлення розплавленого матеріалу (філаменту). Таким чином виріб не можна розглядати як монолітний об'єкт з певного матеріалу. Для визначення максимальних навантажень, а також можливої пластичної поведінки надрукованих деталей, пропонується виконати дослідження на розривній машині УММ-5. Отримані дані дозволять порівняти властивості найбільш популярних і схожих за характеристиками філаментів, ABS і CoPET, визначити вплив величини внутрішнього заповнення моделі, характер руйнування. Результати досліджень [116] показали зменшення межі міцності пропорційно зменшенню величини внутрішнього заповнення, при цьому збереження пружних властивостей зразка можливе лише при 100% заповненні для обох досліджуваних матеріалів. Результати досліджень визначення максимальних навантажень приведені на діаграмах руйнування зразків з ABS пластику при різних величинах внутрішнього заповнення (рис. 4.15 та рис. 4.16) та у табл. 4.11.

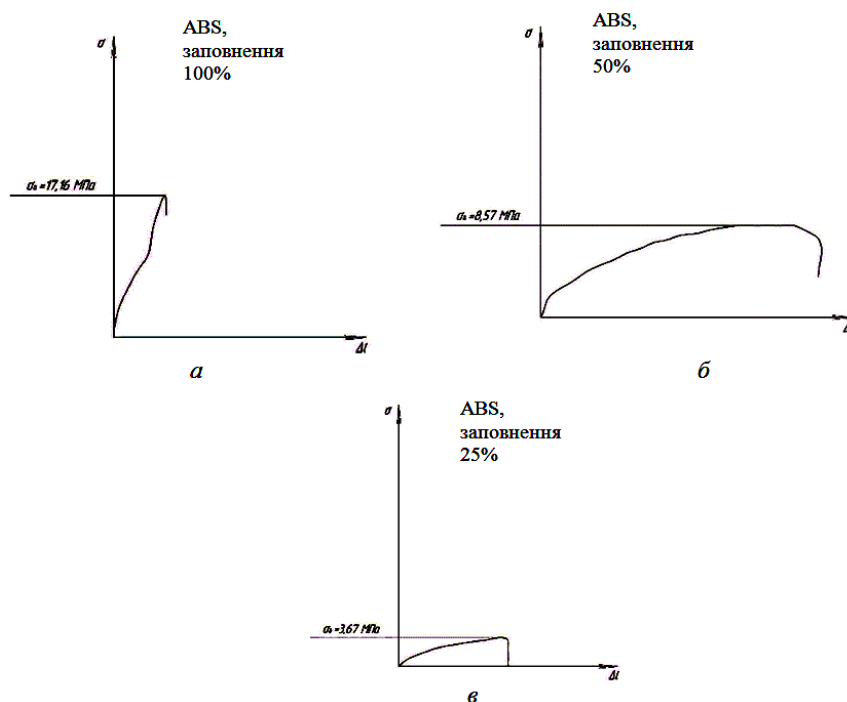


Рис. 4.15. Діаграми руйнувань зразків з ABS пластику при різних величинах внутрішнього заповнення: а – 100%; б – 50%; в – 25%

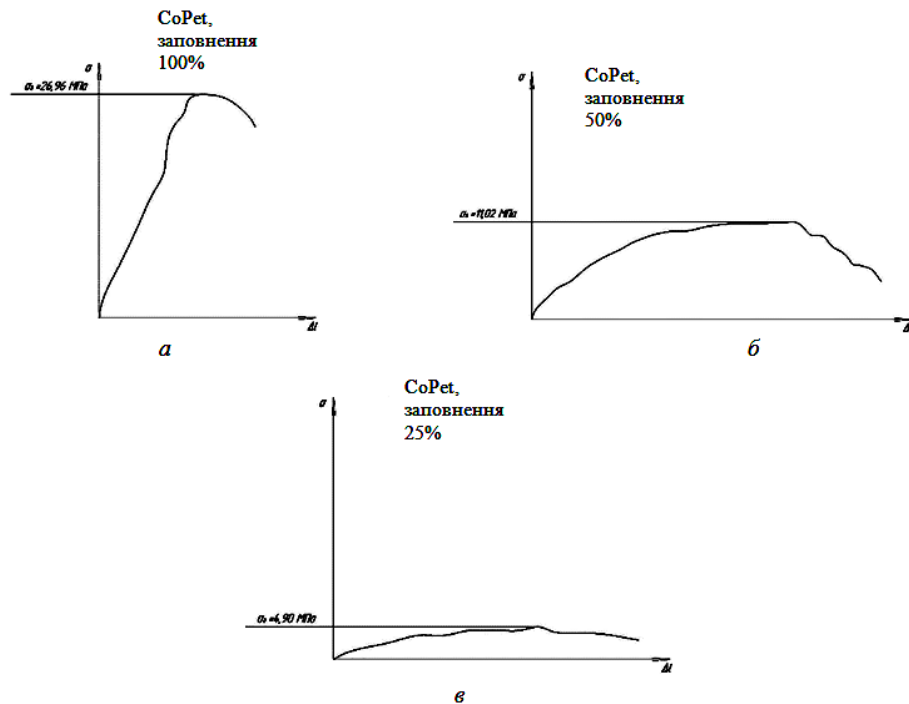


Рис. 4.16. Діаграми руйнувань зразків з CoPET пластику при різних величинах внутрішнього заповнення: *а* – 100%; *б* – 50%;  
*в* – 25%;

Таблиця 4.11

Максимальне навантаження зразків перед руйнуванням

Матеріал, з якого виготовлено зразок	Величина внутрішнього заповнення, %	Максимальне навантаження, кг	Межа міцності, МПа
CoPET	25	200	4,90
ABS	25	150	3,67
CoPET	50	450	11,02
ABS	50	350	8,57
CoPET	100	1100	26,96
ABS	100	700	17,16

Аналіз результатів експерименту [116] визначення механічних характеристик зразків, надрукованих за допомогою адитивних технологій FDM, показав, що зниження внутрішнього заповнення пропорційно зменшує межу

міцності зразка. ABS-пластик виявився менш міцним на розрив у порівнянні з CoPET пластиком. При дослідженні діаграм руйнувань помічено пластичну поведінку у зразків з CoPET, тоді як зразки з ABS демонструють крихке руйнування.

Але зменшення величини внутрішнього заповнення знижує витрати часу і матеріалу, що призводить до позитивного економічного ефекту: заповнення 100% – час друку 3 год. 20хв, витрата матеріалу 89 грам; заповнення 50% – час друку 2 год, витрата матеріалу 51 грам; заповнення 25% – час друку 1 год. 20хв, витрата матеріалу 32 грам.

Отримані результати дослідження дають можливість підбирати спосіб друку деталей з певним % заповненням, виходячи з вимог міцності, то в такому разі доцільно використовувати лише друк зі 100% внутрішнім заповненням.

#### **4.6 Розширення технологічних можливостей оброблення деталей, отриманих за допомогою FDM-друку, та модернізація поворотного стола для верстата з ЧПК**

На підприємствах машинобудування в умовах серійного виробництва широко застосовуються верстати із числовим програмним керуванням (ЧПК) для ефективного оброблення великої номенклатури деталей. Верстати з ЧПК дозволяють виконувати фрезерування площин, уступів, пазів з поворотом деталі на будь-який кут; фрезерування складних криволінійних поверхонь по кількох одночасно керованих координатах: свердлування, зенкерування, розвірчування отворів.

Для підвищення продуктивності та точності механічного оброблення необхідно виконувати технологічні переходи та обробляти максимальну кількість поверхонь деталі із одного установу.

Одним із шляхів підвищення ефективності застосування верстатів з ЧПК являється використання поворотних столів, що призначені для установки та закріплення оброблюваних деталей і дають можливість розширити

технологічні можливості верстатів та проводити оброблення максимальної кількості поверхонь деталі з одного установа.

За допомогою поворотного столу можна без переустановлення проводити оброблення заготовок різноманітних форм із декількох сторін, обертати заготовку в різних координатах для виконання інших технологічних переходів.

Поворотні столи переважно виконуються у вигляді самостійних вузлів, що встановлюються на столі верстата в двох положеннях із горизонтальною та вертикальною віссю залежно від розміщення оброблюваної поверхні.

Поворотні столи, що застосовуються в верстатах з ЧПК, класифікуються за такими ознаками:

- а) кількість осей – одновісний і двовісний;
- б) положення осі обертання – з горизонтальною віссю обертання (переважно на токарних верстатах) і з вертикальною віссю обертання для свердління отворів і фрезерування великої кількості різних деталей (фрезерні, свердлильні, розточувальні, зуборізні, шліфувальні верстати);
- в) тип приводу – електромеханічний, електричний, гідравлічний.

Електромеханічний привід розділяється на приводи з циліндричної передачею, черв'ячною передачею, зубчато-рейковою передачею.

Одним із найбільш важливих питань при виборі обладнання, оснащеного поворотним столом, є економічність. У даний час на ринку є великий вибір верстатів із поворотними столами, але більшість пропозицій має дуже високу ціну, наявність поворотного стола збільшує вартість верстата від 30 до 40 відсотків. Наприклад, вартість верстата із поворотним столом мод. HAAS (США) зростає від 15000 до 45000 доларів. Одним із можливих шляхів зменшення вартості обладнання для малих підприємств є модернізація поворотних столів шляхом заміни ручного приводу.

Такі столи знаходять широке застосування під час багатопозиційного оброблення отворів, фрезерування площин на свердлувальних та фрезерних верстатах. Кріплення деталі до поворотного столу здійснюється за допомогою

т-подібних пазів, стіл може приймати вертикальне або горизонтальне положення.

За допомогою поворотного столу можна без переустановлення проводити оброблення деталей, розташованих по колу, обертати заготовку в різних координатах і виконувати інші операції.

Загальний вигляд поворотного столу мод. 7205-0003 показано на рис. 4.13.

До складу конструкції столу входить корпус, планшайба, черв'ячне колесо, черв'як. Обертання планшайби задається вручну маховичком за допомогою черв'ячної пари. Встановлення планшайби у необхідне положення здійснюється фіксатором, що переміщується за допомогою рукоятки.

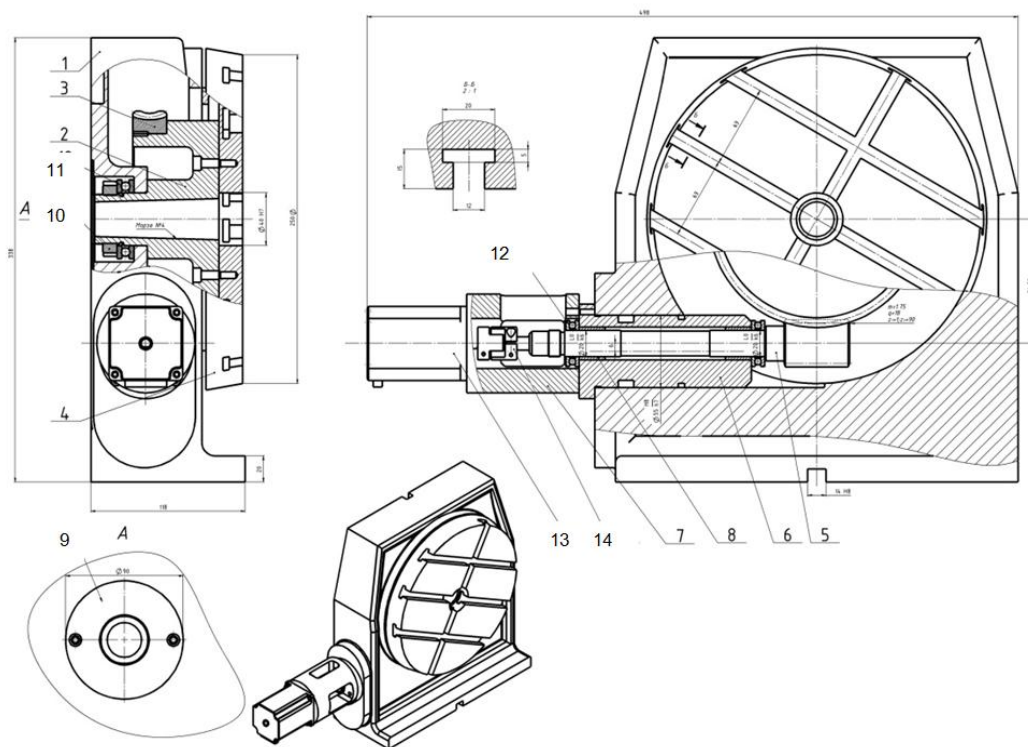
При модернізації столу до корпусу на заміну ручного приводу встановлюється кроковий двигун, що передає рух через з'єднувальну муфту і черв'ячну пару на планшайбу.

Кроковий привод складається із синхронної електричної машини та керуючого контролера. Останній забезпечує подачу сигналів на обмотки двигуна та їх покрокове включення відповідно до заданої програми.

Кроковий двигун перетворює керуючі сигнали в переміщення вала на відповідний кут та фіксацію його в заданому положенні. Кількість кроків таких електродвигунів від 100 до 400, кут кроку – від  $0,9^{\circ}$  до  $3,6^{\circ}$ .

Сучасні крокові електродвигуни забезпечують переміщення робочої частини з точністю 0,01 мм. До того ж вони мають добрий експлуатаційний ресурс завдяки відсутності колекторного вузла (в порівнянні з сервоприводами), який піддається значному зношуванню при експлуатації. Також крокові двигуни не мають вузлів, що підлягають регулярному технічному обслуговуванню, добре переносять механічні перевантаження та не виходять із ладу при аварійних зупинках. За рахунок простоти конструкції крокові двигуни мають відносно невелику вартість, що має велике значення в сучасних реаліях виробництва.

Для керування двигуном використовується мікрокроковий режим, оскільки він має більш високу точність позиціонування ротора, що дає змогу двигуну працювати плавно, без перебоїв.



1 – корпус; 2 – шпindelь; 3 – черв'ячне колесо; 4 – планшайба; 5 – черв'ячний вал; 6 – втулка; 7 – корпус; 8 – втулка; 9 – кришка; 10 – упорний підшипник; 11 – стопорна гайка; 12 – підшипник; 13 – кроковий двигун; 14 – муфта

134

дозволяє валу повертатися на довільний кут, кратний 1,8. При подачі одного керуючого імпульсу кроковий двигун здійснює оберт ротора не менше ніж на половину кроку, при цьому менший кут кроку забезпечує більш точне керування ротором.

Завдяки наявності черв'ячної пари в конструкції стола мінімальний кут повороту планшайби складає  $0,0013^\circ$  при передаточному числі черв'ячної пари 90 (рис. 4.18).

Для інтеграції модернізованого столу в систему металорізального верстата з ЧПК, необхідно зчитувати команди, надіслані зі стійки управління верстатом, і перетворювати команди в сигнали напрямку (DIR) та кроку (PULSE).

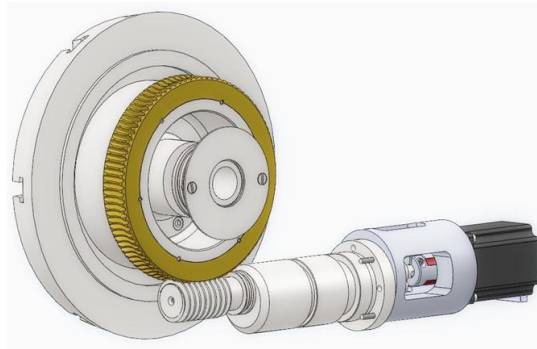


Рис. 4.18. Механізм позиціонування: черв'ячна пара з кроковим двигуном

Для вирішення цієї задачі доцільно використати програмований логічний контролер (PLC).

Загальний коефіцієнт корисної дії механізму столу:

$$\eta_{заг} = \eta_{ЧП} \cdot \eta_{ПК} \cdot \eta_{ПК} \cdot \eta_M = 0,75 \cdot 0,99 \cdot 0,99 \cdot 0,98 = 0,72. \quad , \quad (1)$$

де  $\eta_{ЧП}$  – ККД черв'ячної передачі,  $\eta_{ЧП} = 0,75$  ;

$\eta_{ПК}$  – ККД пари підшипників кочення,  $\eta_{ПК} = 0,99$ ;

$\eta_M$  – ККД муфти,  $\eta_M = 0,98$ .

Максимальний крутний момент на планшайбі столу:

$$M_{ПЛ} = M_{КД} \cdot \eta_{заг} \cdot i = 1,2 \cdot 0,72 \cdot 90 = 77,76 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2)$$

де  $M_{КД}$  – крутний момент крокового двигуна;

$i$  – передавальне число черв'ячної передачі.

Загальний вигляд модернізованого поворотного столу показано на рис.

4.19.



Рис. 4.19. Загальний вигляд модернізованого поворотного столу

Проведена модернізація конструкції поворотного столу, призначеного для установки та закріплення оброблюваних деталей, підвищує ефективність застосування верстатів з ЧПК, особливо для малих підприємств та не призводить до значного дорожчання оснащення. Заміна ручного приводу на кроковий двигун не тільки збільшує експлуатаційний ресурс поворотного столу, але й підвищує точність виконання робіт [117].

З метою інтеграції модернізованого столу в систему металорізального верстата з ЧПК для зчитування команд, надісланих зі стійки управління верстатом і перетворювання команд в сигнали напрямку (DIR) та кроку (PULSE) в роботі запропоновано використання програмованого логічного контролера (PLC).



#### **4.7 Методологія оптимізації конструкції деталей машин для ефективного адитивного виробництва за допомогою SolidWorks Simulation**

За допомогою адитивних технологій значно вдосконалились процеси створення конструкцій складної форми з меншою вагою і ефективнішим використанням матеріалу. 3D-друк знімає багато обмежень щодо форми виробу, які присутні, наприклад, при механічному обробленні деталей на верстатах. Для ефективного моделювання деталей в CAD-системах можуть допомогти методи генеративного (топонімічного) проєктування. На основі визначених обмежень можна оптимізувати форму виробу, зберігши міцнісні характеристики, обмеживши масу.

Система SOLIDWORKS, в додатку Simulation включає інструменти дослідження топології (Topology Optimization), що працює на принципах генеративного дизайну. Пропонується, як приклад, використовуючи вказаний інструмент, оптимізувати форму деталі «Кронштейн», знизивши масу, зменшивши час виготовлення, але при цьому зберегти достатню міцність, при заданих умовах навантаження.

Одним з головних питань забезпечення якості деталей, отриманих FDM-друком, є забезпечення комплексного підходу до якості виробу, що включає в себе: точність відповідальних поверхонь згідно з технічними вимогами, необхідна шорсткість, характеристики міцності матеріалу, дизайн форми з мінімізацією маси деталі.

Автори [118-122] займалися технологіями адитивного виробництва, проєктуванням заготовок у адитивному виробництві для багатоосевого моделювання та параметричним дослідженням спотворень деталей у моделюванні наплавленням з використанням тривимірного аналізу кінцевих елементів. Багато дослідників [123-125] присвятили дослідження вивченню міцності матеріалів на розрив і властивостей шорсткості поверхні, деталей отриманих 3D-друком, та досягнення точності і ефективності процесу друку. Покращенню якості поверхні моделюванням плавного осадження (FDM) на

основі друкованих зразків та вибору критичних параметрів друку присвячені роботи [126-129]. Для ефективного моделювання деталей в CAD-системах можуть допомогти методи генеративного (топонімічного) проєктування. Топологічна оптимізація та адитивні технології дозволяють отримати кінцевий продукт без потреби в додатковому обробленні [129].

Деталізація особливостей застосування сучасних програмних засобів, таких як SolidWorks Simulation, дозволить ефективно інтегрувати оптимізацію топології в процес 3D-друку, що сприяє підвищенню якості дизайну виробу, його вагових характеристик, зниженню часу виготовлення та виробничих витрат.

Згідно з геометричними вимогами та взаємним розташуванням елементів конструкції виконано моделювання деталі «Кронштейн» в системі SOLIDWORKS (рис. 4.20). Функціональні властивості деталі забезпечені, але форма виробу призведе до невиправданої витрати матеріалу при виготовленні FDM-друком. Використання методів генеративного проєктування включає алгоритми FEA (Finite Element Analysis, або аналіз скінченних елементів). Це чисельні методи, які використовуються для розв'язання складних інженерних і фізичних задач, пов'язаних з механічними, термічними, динамічними і іншими видами навантажень. Основна ідея полягає в розподілі області або структури на дрібні, прості елементи (скінченні елементи), для яких можна легко виконати розрахунки.

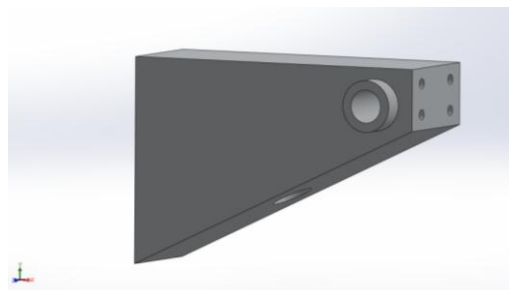


Рис. 4.20. 3D-модель деталі «Кронштейн» виконано в системі  
SOLIDWORKS

Початковим етапом є задання властивостей матеріалу, визначення ступенів свободи деталі, обмежень, а також прикладені навантаження. SolidWorks Simulation використовується для проведення різноманітних інженерних аналізів, включаючи дослідження топології (Topology Optimization).

Дослідження топології дозволяє оптимізувати форму деталі з метою отримання максимальної міцності або мінімізації маси при заданих умовах навантаження і обмежень. Основні можливості SolidWorks Simulation для дослідження топології включають:

- Геометричні обмеження: Можна задати геометричні обмеження для виключення певних областей з аналізу або обмеження розташування матеріалу.
- Умови навантаження: Визначення навантажень, які діють на деталь, таких як сили, моменти, тиск і т.д.
- Критерії оптимізації: Встановлення критеріїв, за якими визначається оптимальна форма деталі (наприклад, мінімізація ваги при заданій міцності).
- Результати інтерпретації: Отримання результатів вигляду оптимізованої топології, яка відповідає заданим умовам.

Створимо нове дослідження в додатку Simulation, обравши дослідження топології (Topology Optimization). Вказуємо матеріал, який буде використовуватись при виготовленні (PETG), обравши його з бібліотеки матеріалів. Вказуємо закріплення деталі та навантаження: кріплення по чотирьох отворах; рівномірно розподілене навантаження на полицю – 10 Н.; навантаження на розтягування від правого торця – 3 Н. (рис. 4.21).

Для збереження функціональних властивостей деталі обмежуємо зони, де матеріал не можна видаляти, це області моделі, які виключені із процесу оптимізації та зберігаються в остаточній формі, сюди можна віднести такі елементи як: отвори, пази, уступи і т.п.

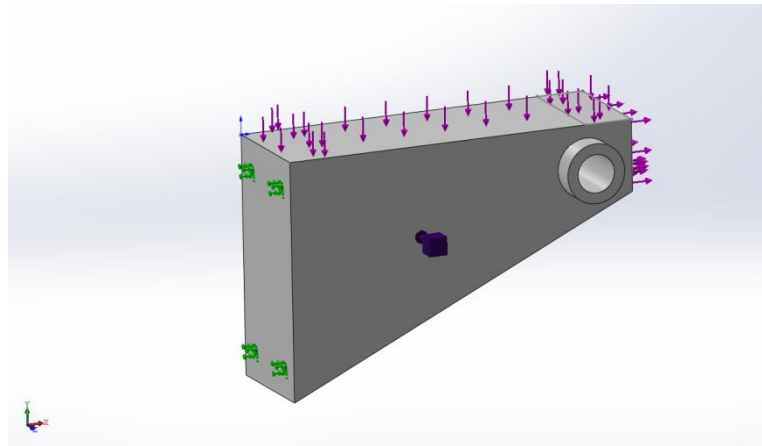


Рис. 4.21. Схема закріплення деталі і поверхні де прикладене навантаження

При цьому є можливість вказувати глибину, на яку матеріал має бути збережений навколо обраних елементів, це зручно використовувати, коли виріб матиме припуск на механічне оброблення відповідальних елементів, де необхідна точність, яка не може бути забезпечена FDM-друком. Геометричні об'єкти, до яких застосовуються навантаження та кріплення, зберігаються за умовчанням. Щоб вибрати області для виключення з оптимізації, переходимо до Топологія > Установки > Установки збереженої (замороженої) області, обираємо відповідні елементи на нашій моделі (рис. 4.22) і вказуємо глибину збереження матеріалу – 3 мм.

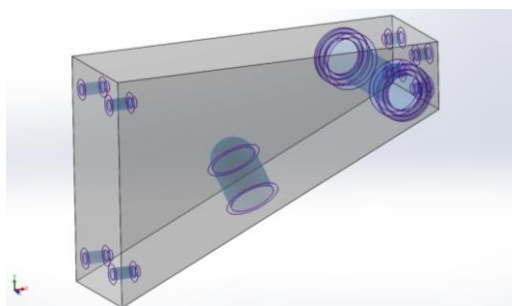


Рис. 4.22. Елементи моделі, які будуть збережені при оптимізації

Для запуску виконання генеративного дизайну залишилось вказати цілі дослідження і обмеження. У додатку Simulation для Topology Optimization існує кілька важливих критеріїв, які використовуються для визначення оптимальної структури.

У дереві дослідження топології обираємо «Цілі та обмеження». У вікні Property Manager обираємо одну з наступних цілей оптимізації: найкраще відношення жорсткості до маси; гранично зменшити масу; гранично зменшити максимальне зміщення. Якщо як ціль вибрано значення найкращого відношення жорсткості до маси, то алгоритм намагається мінімізувати глобальні умови відповідності моделі, які є мірою загальної гнучкості (зворотна величина жорсткості). Умови відповідності визначаються сумою енергій деформації всіх елементів. Якщо як ціль вибрано гранично зменшити максимальне зміщення, то алгоритм оптимізації визначає форму з граничним зменшенням максимального зміщення на одному вузлі (розраховується з урахуванням статичного дослідження). За заданим відсотком матеріалу, що видаляється з компонента, оптимізація призводить до конструкції, яка важить менше вихідної і гранично зменшує максимальне помітне зміщення.

Обравши граничне зменшення маси, алгоритм оптимізації визначає форму, яка важить менше моделі максимального розміру та не порушує заданого цільового обмеження зміщення.

Даний алгоритм прагне зменшити масу компонента з одночасним обмеженням зсуву (максимальне значення компонента або значення, що визначається користувачем в одному вузлі) в рамках певного граничного обмеження.

За замовчуванням обрана ціль найкращого відношення жорсткості до маси, залишимо це без змін. Проектування деталей з мінімальною масою і достатньою міцністю є критичним для ряду причин:

ефективне використання ресурсів: мінімізація маси дозволяє зменшити використання матеріалів, що є важливим з економічної точки зору і сприяє зменшенню ваги кінцевого виробу;

покращення експлуатаційних характеристик: легші конструкції зазвичай мають кращі динамічні і теплові характеристики, що може підвищити ефективність виробу і зменшити витрати на його експлуатацію.

Зниження впливу на навколишнє середовище: легші вироби споживають менше енергії під час транспортування і мають менший вуглецевий слід, що допомагає зменшити екологічне навантаження.

Також в Topology Optimization доступні обмеження виробничого контролю, наприклад, керування симетрією.

Керування симетрією робить оптимізований проєкт симетричним відносно зазначеної площини. До оптимізованого проєкту можна застосувати половину, чверть або одну восьму площинної симетрії.

На рис. 4.23 показаний приклад половинної симетрії, таке обмеження найкраще підійде для нашої деталі.

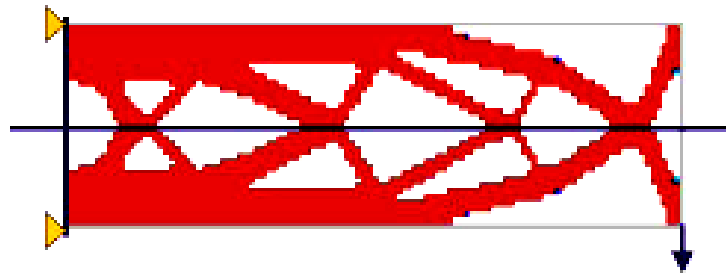


Рис. 4.23. Оптимізована конструкція балки з обмеженням половинної симетрії

Проводиться розрахунок, а результатом є оптимізована топологія у формі полігональної сітки з графічним зображенням, що показує, які ділянки можна видалити, а які потрібно залишити (рис. 4.24).

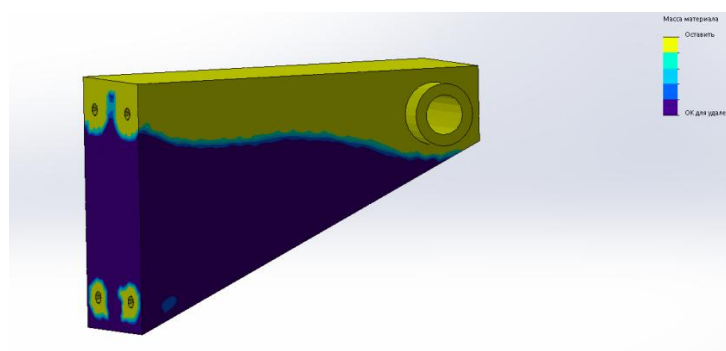


Рис. 4.24. Модель після виконання аналізу

Жовтим кольором позначено області, які потрібно зберегти, синім – області, дозволені для видалення згідно з розрахунком. Використовуючи повзунок зліва (рис. 4.25), можна видаляти області до бажаного відсотку зекономленої маси. Для подальшої роботи натискаємо «Розрахувати згладжену сітку» і завдяки цьому модель набуває плавних переходів, при цьому стає активний повзунок для налаштування плавності переходу геометрії (рис. 4.26)

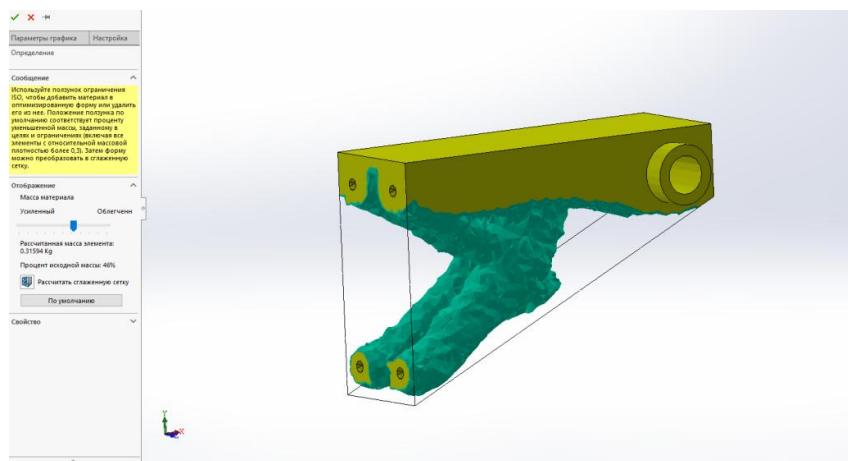


Рис. 4.25. Оптимізована модель деталі

Дані згладженої сітки для оптимізованої форми можна експортувати як нову геометрію. Щоб відкрити вікно PropertyManager «Експорт згладженої сітки», обираємо розділ «Результати» далі «Експорт згладженої сітки». Доступні такі варіанти: «Графічне тіло», експорт даних згладженої сітки у скороченому форматі подання, обираємо цей варіант, щоб його можна було використовувати як копію для зміни геометрії вихідного компонента; «Тверде тіло», експорт даних згладженої сітки у вигляді твердого тіла (формат файлів \*SLDPRT), для цього варіанта розрахунок потребує більше часу; «Тіло поверхні», експорт даних згладженої сітки, які відносяться лише до геометрії поверхні (формат файлів \*. STL), цей варіант найкраще підходить для подальшої підготовки до 3D-друку в спеціальній програмі – слайсері.

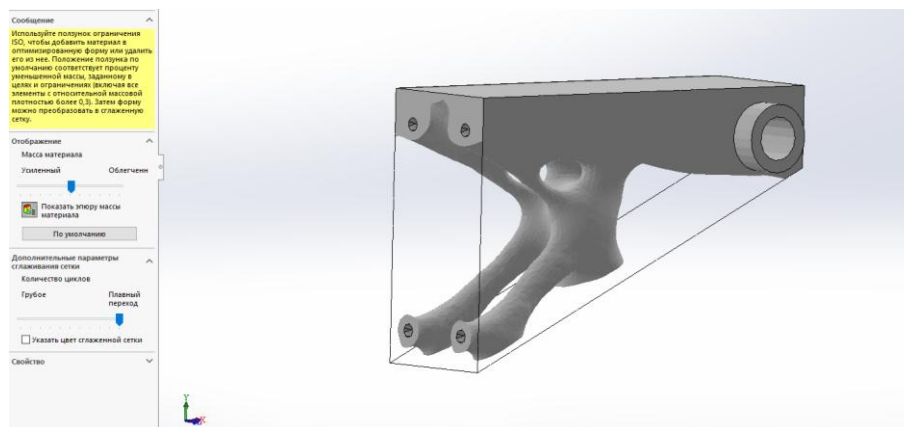


Рис. 4.26 Модель деталі у вигляді згладженої сітки

Виконуємо порівняння оригінальної та оптимізованої моделі під час підготовки до 3D-друку. Підготовка G-коду виконана в програмі Simplify3d для FDM-принтера Artillery sidewinder x1, діаметр сопла – 0,4 мм. Матеріал – CoPET. Режими друку: температура сопла – 245°C; температура столу – 90°C; висота шару – 0,2 мм; швидкість друку – 75 мм/с; кількість зовнішніх шарів – 2; заповнення 100%; тип заповнення – Rectilinear (шари накладаються з перехрещуванням в 90°). Результати слайсінгу (підготовка G-коду) показали такі дані: для оригінальної моделі (рис. 4.27) час друку становить 29 год. 30 хв, маса виробу – 600,17 грам; час друку оптимізованої моделі – 15 год 50 хв, маса – 304,41 грам (рис. 4.28).

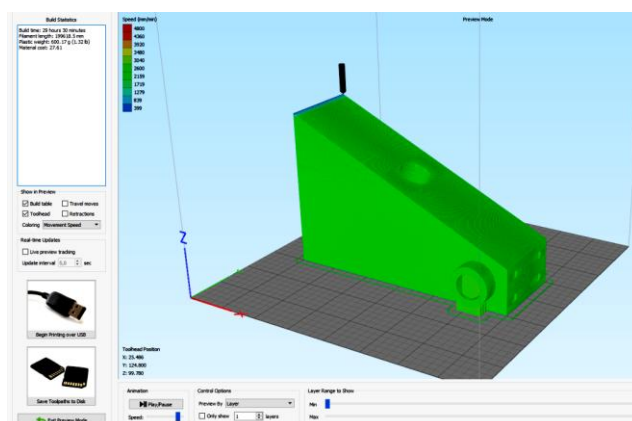


Рис. 4.27. Підготовка до друку оригінальної моделі



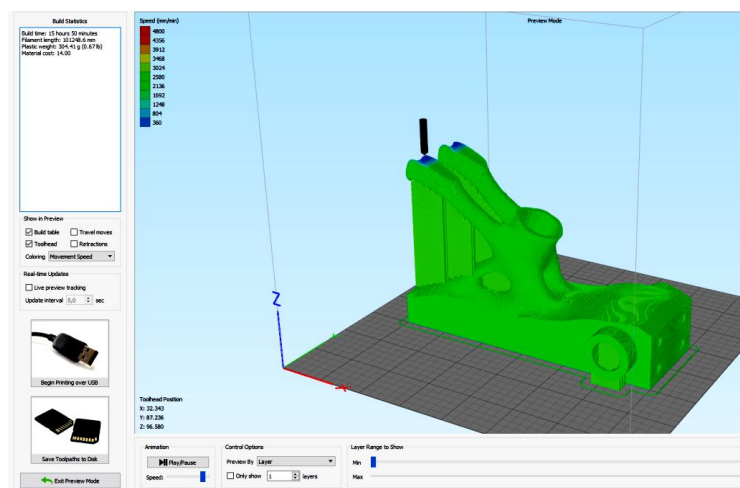


Рис. 4.28. Підготовка до друку оптимізованої моделі

Інструмент дослідження топології та адитивні технології представляють новий етап у розвитку машинобудування. Завдяки цим методам можна створювати деталі будь-якої форми і розміру, які важко виготовити за допомогою литва чи оброблення тиском. Виготовлення складних прес-форм часто потребує додаткового оброблення на верстатах з ЧПК, що призводить до високих витрат, численних операцій та значного часу у виробництві кінцевого продукту. Однак топологічна оптимізація та адитивні технології дозволяють отримати кінцевий продукт без потреби в додатковому обробленні. Це знижує масу деталі на 40–60% при збереженні всіх статичних характеристик, що дозволяє економити на матеріалах, скоротити час на підготовку виробництва і зменшити обсяги механічного оброблення.

Завдяки виконаній оптимізації конструкції деталі маса виробу зменшилася на 50,7%, а термін виготовлення деталі за технологією FDM-друку скоротився на 53,7% [102].

## 4.8 Висновки до розділу 4

1. Проаналізувавши результати досліджень – фрезерування пластикових деталей отриманих FDM-друком із матеріалу CoPET було встановлено, що найбільша точність та якість оброблених поверхонь (паза та уступу) може бути

досягнута при використанні фрези з твердого сплаву з полірованою поверхнею, частково придатним також виявився інструмент зі швидкорізальної сталі HSS. Також встановлено найкращі режими різання по шорсткості та точності, які відповідають обертам шпинделя – 2240 об/хв; швидкості різання – 56 м/хв. та подачі – 400 мм/хв.

При фрезеруванні площин деталей збірною фрезою Ø63 мм найкращий результат по шорсткості та точності отримано при використанні змінних пластинок APKT1135PDR-MA, обертів шпинделя – 1600 об/хв; швидкості різання – 318 м/хв. та подачі – 125 мм/хв.

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

3. Порівняльний аналіз результатів експерименту щодо визначення механічних характеристик зразків, надрукованих за допомогою адитивних технологій FDM, показав, що зниження внутрішнього заповнення пропорційно зменшує межу міцності зразка. ABS-пластик виявився менш міцним на розрив у порівнянні з CoPET-пластиком. При дослідженні діаграм руйнувань помічено пластичну поведінку у зразків з CoPET, тоді як зразки з ABS демонструють крихке руйнування. Але зменшення величини внутрішнього заповнення знижує витрати часу і матеріалу, що призводить до позитивного економічного ефекту: заповнення 100% – час друку 3 год 20 хв, витрата матеріалу 89 грам; заповнення 50% – час друку 2 год, витрата матеріалу 51 грам; заповнення 25% – час друку 1 год 20 хв, витрата матеріалу 32 грам. Отримані результати дослідження дають можливість підбирати спосіб друку деталей з певним % заповненням, виходячи з вимог міцності. то в такому разі доцільно використовувати лише друк зі 100% внутрішнім заповненням.

4. Проведена модернізація конструкції поворотного стола підвищує ефективність застосування верстатів з ЧПК, особливо для малих підприємств та не призводить до значного дорожчання оснащення. Заміна ручного приводу на кроковий двигун не тільки збільшує експлуатаційний ресурс поворотного стола, але й підвищує точність виконання робіт. З метою інтеграції модернізованого стола в систему металорізального верстата з ЧПК для зчитування команд, надісланих зі стійки управління верстатом, і перетворення команд в сигнали напрямку (DIR) та кроку (PULSE) в роботі запропоновано використання програмованого логічного контролера (PLC).

5. Із застосуванням програмного продукту SolidWorks проведена топологічна оптимізація, за допомогою адитивних технологій, яка дозволяє отримати кінцевий продукт без потреби в додатковій обробленні. 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.

Завдяки виконаній оптимізації конструкції деталі маса виробу зменшилася на 50,7%, а термін виготовлення деталі за технологією FDM-друку скоротився на 53,7%.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації розв'язано важливу науково-технічну проблему в галузі машинобудування, яка має потенціал для вирішення народногосподарських питань. Ця проблема полягає у розробці технологій для забезпечення високої якості деталей машин, виготовлених за допомогою 3D-друку з пластмас.

Основні результати та висновки роботи детально представлені нижче:

1. Проведений аналіз досліджень застосування технологій 3D-друку показав, що FDM-друк є відносно дешевим та швидким методом виготовлення деталей, однак отримані деталі можуть мати недоліки у вигляді неідеальної поверхні та відхилень від заданих розмірів. Механічне оброблення деталей, отриманих за допомогою FDM-друку, дозволяє усунути ці недоліки та забезпечити високу якість та точність деталей. Застосування механічного оброблення може зменшити кількість відбракованих деталей та збільшити ефективність виробництва. Крім того, впровадження механічного оброблення деталей, отриманих за допомогою FDM-друку, може допомогти зменшити потребу використання литва під тиском, оскільки деталі не будуть поступатися по точності та якості.

2. При аналізі експериментальних досліджень процесу друку деталей машин, отриманих 3D-друком, встановлено, що завдяки підбору технологічних параметрів обладнання для 3D-друку не вдається отримати необхідну точність та шорсткість поверхонь деталей, отриманих після друку.

3. З аналізу літературних джерел встановлено, що покращення точності та шорсткості деталей машин, отриманих 3D-друком, можливе при застосуванні постоброблення відповідальних поверхонь згідно з технічними вимогами. При цьому досягається необхідна шорсткість при рекомендованих міцностних характеристиках матеріалу, з мінімізацією маси деталі та визначення оптимальних параметрів вибору різального інструмента та режимів різання.

4. Проведено порівняння закономірностей процесу різання пластмас із закономірностями процесу різання металів з метою врахування їхньої відмінності при обробленні на металорізальних верстатах, при використанні металорізального інструменту. Визначено основні фізичні фактори, що діють на поверхню заготовки з пластмаси в процесі різання.

5. Проведено аналіз аналітичних моделей процесу обточування та фрезерування з урахуванням пружних деформацій поверхні пластикових заготовок чим вони відрізняються від оброблення металевих заготовок.

6. Отримала подальший розвиток побудова математичної моделі процесу різання обточуванням та фрезеруванням поверхонь деталей з пластмас, виготовлених 3D-друком, у порівнянні з процесом різання металів 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;

7. З аналізу аналітичних моделей, які описують точність виконання розмірів відповідальних поверхонь, з урахуванням пружних відтискань поверхні, можна констатувати, що пружні відтискання поверхонь при обточуванні значно більші при чорнових видах оброблення (від 130 до 150 мкм), ніж при чистових (від 44 до 65 мкм), а при чорновому фрезеруванні від 220 до 280 мкм та чистовому фрезеруванні від 45 до 65 мкм і незначні в порівнянні з технічними вимогами по допусках на дані поверхні.

8. 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 необхідністю розробити такий алгоритм розрахунку траєкторії руху інструмента, який враховує процеси, що протікають при утворенні поверхні деталі, та застосовувати програмно-математичне забезпечення, що дозволить управляти процесом оброблення за заданим алгоритмом. Розробка та використання цих компонентів

при проектуванні 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 шорскості забезпечує найменший час оброблення.

9. Проаналізовано результати досліджень фрезерування пластикових деталей, отриманих FDM-друком із матеріалу CoPET, та 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 по шорсткості та точності.

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

11. Порівняльний аналіз результатів експерименту із визначення механічних характеристик зразків, надрукованих за допомогою адитивних технологій FDM, показав, що зниження внутрішнього заповнення пропорційно зменшує межу міцності зразка. ABS-пластик виявився менш міцним на розрив у порівнянні з CoPET пластиком. При дослідженні діаграм руйнувань помічено пластичну поведінку у зразків з CoPET, тоді як зразки з ABS демонструють крихке руйнування. Але зменшення величини внутрішнього заповнення знижує витрати часу і матеріалу, що призводить до позитивного економічного ефекту: заповнення 100% – час друку 3 год 20 хв, витрата матеріалу 89 грам; заповнення 50% – час друку 2 год, витрата матеріалу 51 грам; заповнення 25% – час друку 1 год. 20 хв, витрата матеріалу 32 грам. Отримані результати дослідження дають можливість підбирати спосіб друку деталей з певним % заповненням, виходячи з вимог міцності.

12. Використовуючи деталі виготовлені 3D-друком проведена модернізація конструкції поворотного стола підвищує ефективність застосування верстатів з ЧПК, особливо для малих підприємств та не призводить до значного удорожчання оснащення. Заміна ручного приводу на кроковий двигун не тільки збільшує експлуатаційний ресурс поворотного стола, але й підвищує точність виконання робіт. З метою інтеграції модернізованого стола в систему металорізального верстата з ЧПК для зчитування команд, надісланих зі стійки управління верстатом, і перетворення команд в сигнали напрямку (DIR) та кроку (PULSE) в роботі запропоновано використання програмованого логічного контролера (PLC).

13. Проведена із застосуванням програмного продукту SolidWorks топологічна оптимізація конструкції виробу за допомогою адитивних технологій, яка дозволяє отримати кінцевий продукт без потреби в значному додатковому обробленні. 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. Завдяки виконаній оптимізації конструкції деталі маса виробу зменшилася на 50,7%, а термін виготовлення деталі за технологією FDM-друку скоротився на 53,7%.

### Список використаних джерел

1. Fastermann, P.: 3D-Druck/Rapid Prototyping. *Springer*, 2012, ISBN 978-3-642-29224-8.
2. Bakar, N.S.A., Alkahari, M. R. and Boejang, H. Analysis on fused deposition modelling performance. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, Vol. 11 №12, 2010. pp. 972–977.
3. Cai C., Tey W. S., Chen J., Zhu W., Liu X., Liu T., Zhao L. and Zhou K. Comparative study on 3D-printing of polyamide 12 by selective laser sintering and multi jet fusion. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 288, 2021. p. 116882.
4. Chen, Y .F., Wang, Y. H. and Tsai, J. C. Enhancement of surface reflectivity of fused deposition modeling parts by post-processing. *Optics Communications*, Vol. 430, 2019. pp. 479–485.
5. Chen, X., Liu, W., Dong, B., Lee, J., Ware, H.O.T., Zhang, H. F. and Sun, C. High-speed 3D printing of millimeter-size customized aspheric imaging lenses with sub 7 nm surface roughness. *Advanced Materials*, Vol.30 №18, 2018. doi: 10.1002/adma.201705683.
6. Caggiano, A., Teti, R., Alfieri, V. and Caiazzo, F. Automated laser polishing for surface finish enhancement of additive manufactured components for the automotive industry. *Production Engineering*, Vol. 15 №1, 2020. pp.109–117, doi: 10.1007/s11740-020-01007-1.
7. Cai, C., Tey, W.S., Chen, J., Zhu, W., Liu, X., Liu, T., Zhao, L. and Zhou, K. Comparative study on 3D printing of polyamide 12 by selective laser sintering and multi jetfusion. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 288, 2021. p. 116882.
8. Castro-Casado, D. Chemical treatments to enhance surface quality of FFF manufactured parts: a systematic review. *Progress in Additive Manufacturing*, Vol. 6 №2, 2021. pp. 307-319.



9. Jo, K. H., Jeong, Y. S., Lee, J. H. and Lee, S. H. A study of post-processing methods for improving the tightness of a part fabricated by fused deposition modeling. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 17 № 11, 2016. pp. 1541–1546.
10. Jyothish Kumar, L., Pandey, P. M. and Wimpenny, D. I. 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies, *Springer*, Singapore, 2018. doi: 10.1007/978-981-13-0305-0.
11. Чонка Е. Я, Новаковський О. Г., Серов В. В. Дослідження якості поверхні при виготовленні моделей на 3D-принтері. *Процеси механічної обробки, верстати та інструмент: збірник наукових праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2019. С. 201–202.*
12. Chohan, J. S. and Singh, R. Pre and post processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts: a state of art review and future applications, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 23 № 3, 2017. pp. 495–513.
13. Townsend, V., and R. J. A Systems Approach to Hybrid Design: Fused Deposition Modeling and CNC Machining. *In Global Product Development*, Heidelberg: Springer Berlin. 2011. pp.711–720.
14. Dey, A. and Yodo, N. A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, MDPI, Vol. 3 No. 3, 2019. p. 64.
15. Hashemi, S. M., Parvizi, S., Baghbanijavid, H., Tan, A.T., Nematollahi, M., Ramazani, A., Fang, N. X. and Elahinia, M. Computational modelling of process–structure– property–performance relationships in metal additive manufacturing: a review. *International Materials Reviews*, Vol. 67 № 1, 2022. pp. 1–46.
16. Du, W., Bai, Q. and Zhang, B. A novel method for additive/subtractive hybrid manufacturing of metallic parts. *Procedia Manufacturing*, Vol. 5, 2016. pp. 1018–1030.

17. Hashemi, S. M., Parvizi, S., Baghbanijavid, H., Tan, A. T., Nematollahi, M., Ramazani, A., Fang, N. X. and Elahinia, M. Computational modelling of process–structure–property–performance relationships in metal additive manufacturing: a review. *International Materials Reviews*, Vol. 67 №1, 2022. pp. 1–46.
18. Di, L. and Yang, Y. (2021), “Cost modeling and evaluation of direct metal laser sintering with integrated dynamic process planning. *Sustainability* (Switzerland), Vol. 13. №1, 2021. pp. 1–17.
19. Gong, M., Meng, Y., Zhang, S., Zhang, Y., Zeng, X. and Gao, M. Laser-arc hybrid additive manufacturing of stainless steel with beam oscillation. *Additive Manufacturing*, Vol. 33, 2020. p. 101180.
20. Jyothish Kumar, L., Pandey, P. M. and Wimpenny, D. I. 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies, *Springer, Singapore*. 2018, doi: 10.1007/978-981-13-0305-0.
21. Kale, A., Lakshman, A. and Kumar, M.M.K. Optimization of hybrid manufacturing process parameters by using FDM in CNC machine optimization of hybrid manufacturing process parameters by using FDM in CNC machine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 402, 2018. pp. 402–428.
22. Kholgh Eshkalak, S., Rezvani Ghomi, E., Dai, Y., Choudhury, D. and Ramakrishna, S. The role of three- dimensional printing in healthcare and medicine. *Materials & Design*, Vol. 194, 2020. p. 108940.
23. Kowsari, K., Zhang, B., Panjwani, S., Chen, Z., Hingorani, H., Akbari, S., Fang, N.X. and Ge, Q. Photopolymer formulation to minimize feature size, surface roughness, and stair-stepping in digital light processing-based three- dimensional printing. *Additive Manufacturing*, Vol. 24, 2018. pp. 627–638.
24. Nancharaiah, T. Optimization of process parameters in FDM process using design of experiments. *International Journal on Emerging Technologies*, Vol. 2, №1, 2011. pp. 100–102.
25. Salmi, M. Additive manufacturing processes in medical applications. *Materials*, Vol. 14, №1, 2021. pp. 1–16.

26. Tiwary, V. K., Arunkumar, P., Deshpande, A. S. and Rangaswamy, N. Surface enhancement of FDM patterns to be used in rapid investment casting for making medical implants”, *Rapid Prototyping Journal*, ”, Vol. 25, №5, 2019 pp. 904–914.
27. Veeman, D., Sai, M. S., Sureshkumar, P., Jagadeesha, T., Natrayan, L., Ravichandran, M. and Mammo, W. D. Additive manufacturing of biopolymers for tissue engineering and regenerative medicine: an overview, potential applications, advancements, and trends. *International Journal of Polymer Science*, Vol.4, 2021, doi: 10.1155/2021/4907027.
28. Zhang Y., Chou K. A parametric study of part distortions in fused deposition modelling using three-dimensional finite element analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture*. V. 222(8). 2008. pp. 959–967.
29. Fastermann, P.: 3D-Druck. *Rapid Prototyping*. Springer, 2012, ISBN 978-3-642-29224-8.
30. 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 3,2022. pp. 358–369.
31. 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*. 60, 2017. pp. 229–234.
32. Ranellucci, A.: Slic3r G-Code generator for 3D printers, <http://slic3r.org/>, last accessed 2014-08-27.
33. Schmidt, T.: RepSnapper RepRap control software, 2016 <https://github.com/timschmidt/rep-snapper>.
34. Stratasys Ltd: Legal Information, 2014, <http://www.stratasys.com/legal/legal-information>.

35. Chohan, J .S. and Singh, R. Pre and post processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts: a state of art review and future applications. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 23, №3, 2017. pp. 495–513.
36. I. C. Gherghea, C. Bungau, D. C. Negrau. Lead time reduction and increasing productivity by implementing lean manufacturing methods in cnc processing center. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 568,1 2019.
37. Lee, W. C., Wei, C. C. and Chung, S. C. Development of a hybrid rapid prototyping system using low-cost fused deposition modeling and five-axis machining. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214 No. 11, 2014. pp. 2366–2374.
38. Yadollahi A., Shamsaei N. Additive manufacturing of fatigue resistant materials: challenges and opportunities. *Int J Fatigue* 98, 2017. pp.14–31.
39. Atonal-Sánchez J., Beltrán-Fernández J. A., Hernández-Gómez L. H., López-Lievano A., Moreno-Garibaldi. Termomechanical analysis of 3D printing specimens (acrylonitrile butadiene styrene). *Advanced Structured Materials*. V. 92. 2019. pp. 237–253.
40. Dey, A. and Yodo, N. A systematic survey of FD Mprocess parameter optimization and their influence on part characteristics. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, MDPI, Vol. 3, №3, 2019. p. 64.
41. ABS - пластик для 3D друку. Опис і порівняння. 3D4U.COM.UA. URL:<https://3d4u.com.ua/uk/blog/post/4-abs-plastik-dlya-3d-pechaty-opisanie-i-sravnenie> (Дата звернення 22.10.2023)
42. Eßbach, C., Fischer, D. and Nickel, D. Challenges in electroplating of additive manufactured ABS plastics. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 68, 2021. pp. 1378–1386.
43. Colpani, A., Fiorentino, A. and Ceretti, E. Characterization of chemical surface finishing with cold acetone vapours on ABS parts fabricated by FDM. *Production Engineering*, Vol. 13 №3/4, 2019. pp. 437–447.

44. Sun Q., Rizvi G. M., Bellehumeur C. T., Gu P. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyping Journal*. V.14(2). 2008. pp. 72–80.
45. AinMaidin N, Rahman MHA, Ahmad MN, Osman MH, Wahid MK, Firdaus MS, Halyani MY, Razali MZA . A prototype development of anti-hunchback device. *J Mech Eng SI*, 5(1), 2018. pp.192–2096.
46. Kulkarni P, Dutta D. On the integration of layered manufacturing and material removal processes. *J Manuf Sci Eng*. 122(1), 1999. pp.100–108.
47. Kuo C-C, Mao R-C. Development of a precision surface polishing system for partsfabricated by fused deposition modeling. *Mater Manuf Processes* 31(8). 2016. pp.1113–1118.
48. Boschetto A, Bottini L, Veniali F. Finishing of fused deposition modeling parts by CNC machining. *Robot Comput- Integrat Manuf*. 41. 2016. pp. 92–101.
49. Hossain M. S, Espalin D, Ramos J, Perez M, Wicker R. Improved mechanical properties of fused deposition modelingmanufactured parts through build parameter modifications. *J Manuf Sci Eng*. 136(6), 2014. pp.06100.
50. Lee C.S., Kim S.G., Kim H.J., Ahn S.H. Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts. *J Mater Process Technol*, 187, 2007. pp. 627–630.
51. Sood A.K., Ohdar R.K., Mahapatra S.S. Improving dimen- sional accuracy of fused deposition modelling processed part using grey *Taguchi method*. *Mater Design* 30(10) 2009. pp.4243–4252.
52. 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. *Rapid Prototyping J* 23(3), 2017 pp.495–513.
53. Ferchow, J., Baumgartner, H., Klahn, C. and Meboldt, M. Model of surface roughness and material removal using abrasive flow machining of selective laser melted channel. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 26, №7, 2020. pp. 1165–1176.

54. Грабченко, Анатолій Іванович; Доброскок, Володимир Ленінмирович. Сучасні технології матеріалізації комп'ютерних моделей. *Х.: НТУ" XIII*, 2009. С. 45–46.
55. Jo, K. H., Jeong, Y. S., Lee, J. H. and Lee, S. H. A study of post-processing methods for improving the tightness of a part fabricated by fused deposition modeling. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 17, №11, 2016. pp. 1541–1546.
56. Lalehpour, A. and Barari, A. Post-processing for fused deposition modeling of parts with an acetone vapor bath. *IFAC – Papers OnLine*, Vol. 49 № 31, 2016. pp. 42–48.
57. Horvath, D., Noorani, R. and Mendelson, M. Improvement of surface roughness on ABS 400 polymer using design of experiments (DOE). *Materials Science Forum*, Vol. 561/565, 2007. pp. 2389–2392.
58. Khan, M. S. and Mishra, S. B. Materials today: proceedings minimizing surface roughness of ABS-FDM build parts: an experimental approach. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 26. №40, 2020. doi: 10.1016/j.matpr. 2020. 02.320.
59. Булах І. О., Глоба О. В. Дефекти в композиційних матеріалах при їх виготовленні, експлуатації та механічній обробці. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2013. № 1. С. 60–63.
60. Nancharaiah, T., Raju, D. R. and Raju, V. R. An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components. *International Journal on Emerging Technologies*, Vol. 1, №2, 2010. pp. 106–111.
61. Nguyen, T.K. and Lee, B.K. Post-processing of FDM parts to improve surface and thermal properties. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 24, №7, 2018. pp. 1091–1100.
62. Oyelola, O., Crawforth, P., M'Saoubi, R. and Clare, A.T. Machining of additively manufactured parts: implications for surface integrity. *Procedia CIRP*, Vol. 45, 2016. pp. 119–122.

63. Pandey, P. M., Reddy, N. V. and Dhande, S. G. Improvement of surface finish by staircase machining in fused deposition modeling. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 132, №1/3, 2003. pp. 323–331.
64. Pugalendhi, S. Experimental investigation of surface roughness for fused deposition modeled part with different angular orientation. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, Vol. 5, №3. 2012. pp. 234–240.
65. Rao, A. S., Dharap, M. A., Venkatesh, J. V .L. and Ojha, D. Investigation of post processing techniques to reduce the surface roughness of fused deposition modeled parts. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, Vol. 3, 2012. pp. 531–544.
66. Singh, R. and Trivedi, A. Experimental investigations for surface roughness and dimensional accuracy of FDM components with barrel finishing. *Proce Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, Vol. 87 No. 3, 2017. pp. 455–463.
67. Sood, A. K., Mahapatra, S. S. and Ohdar, R. K. Weighted principal component approach for improving surface finish of ABS plastic parts built through fused deposition modelling process. *International Journal of Rapid Manufacturing*, Vol. 2, №1/2, 2011. p. 4.
68. Tamburrino, F., Barone, S., Paoli, A. and Rationale, A.V. Post-processing treatments to enhance additively manufactured polymeric parts: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 16 №2, 2021. pp. 218–251.
69. Луців І. В., Ярема І. Т., Стахурський О. О. Аналіз силових факторів при обробці полімерних матеріалів різанням. «Актуальні задачі сучасних технологій»: матеріали 5-ої міжнар. наук.-техніч. конф. (м. Тернопіль, 17–18 листопада 2016 р.). Тернопіль, 2016. С. 256.
70. Томашевський, О.О. і Балицька, Н.О. 2023. Особливості фрезерної обробки композитних матеріалів. Аналітичний огляд. *Технічна інженерія*. 1(91) (Лип 2023). С. 92–100.

71. Самчук, Володимир Володимирович. Підвищення ефективності механічної обробки виробів із полімерних композитних матеріалів (ПКМ). *Машинобудування*, 2014. С. 107-115.

72. Lavecchia, F., Grazia, M., Luigi, G. and Galantucci, M. Chemical vapor treatment to improve surface finish of 3D printed polylactic acid (PLA) parts realized by fused filament fabrication. *Progress in Additive Manufacturing*, Vol. 7, №1, 2021. pp. 65–75, doi: 10.1007/s40964-021-00213-2.

73. Zhang, Y., Jarosinski, W., Jung, Y.G. and Zhang, J. Additive manufacturing processes and equipment, Additive Manufacturing. *Materials, Processes, Quantifications and Applications*, 2018. pp. 39–51.

74. Zhang, P., Liu, Z., Du, J., Su, G., Zhang, J. and Xu, C. On machinability and surface integrity in subsequent machining of additively-manufactured thick coatings: a review. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 53, 2020. pp. 123–143.

75. Луців І. В., Дячук Д. С. Особливості обробки різанням полімерно-композитних матеріалів. *Матеріали XVIII наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя* (м. Тернопіль, 29–30 жовтня 2014 року.). Тернопіль: ТНТУ, 2014. 324 с.

76. Horvath, D., Noorani, R. and Mendelson, M. Improvement of surface roughness on ABS 400 polymer using design of experiments (DOE). *Materials Science Forum*, Vol. 561/565, 2007. pp. 2389–2392.

77. Пат. 95063 Україна, МПК В23В 1/00, В23С 3/02. Пристрій для механічної обробки циліндричних виробів / Самчук В.В.; заявник і патентовласник Укр. інж.-пед. акад. №u201406895; заявл. 19.06.2014; опубл.10.12.2014. Бюл. № 23.

78. Пат. 61430 Україна, МПК В23В 29/00. Пристрій для розточування отворів / Сичов Ю. І., Тарасюк А. П., Лях Б. Г., Самчук В. В.; заявник і патентовласник Укр.інж.-пед. акад. №u201013318; заявл. 09.11.2010; опубл. 25.07.2011. Бюл. №14.

79. Kuo, C.C., Wang, C.W., Lee, Y.F., Liu, Y.L. and Qiu, Q.Y. A surface quality improvement apparatus for ABS parts fabricated by additive manufacturing, international journal of advanced manufacturing technology. *The International*



*Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89 Nos 1/4, 2017. pp. 635–642.

80. Тарасевич Ю. Я. Теорія пружності: конспект лекцій. Частина 1. Напружено-деформований стан у точці тіла. Плоска задача теорії пружності в декартових координатах. Суми: Вид-во СумДУ, 2010. 116 с.

81. Nancharaiah, T., Raju, D. R. and Raju, V. R. An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components. *International Journal on Emerging Technologies*, Vol. 1 № 2, 2010. pp. 106–111.

82. Nguyen, T. K. and Lee, B. K. Post-processing of FDM parts to improve surface and thermal properties. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 24 № 7, 2018. pp. 1091–1100.

83. Oyelola O., Crawford P., M'Saoubi R. and Clare, A. T. Machining of additively manufactured parts: implications for surface integrity. *Procedia CIRP*, Vol. 45, 2016. pp. 119-122.

84. Oyelola O., Crawford P., M'Saoubi R. and Clare A. T. Machining of additively manufactured parts: implications for surface integrity. *Procedia CIRP*, Vol. 45, 2016. pp. 119–122.

85. Puerta A. P. V., Lopez-Castro J. D., López A.O. and Vidal S. R. F. On improving the surface finish of 3D printing polylactic acid parts by corundum blasting. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 7, 2021. pp. 1398–1407, doi: 10.1108/RPJ-05-2021-0105.

86. Singh R. and Trivedi, A. (2017), “Experimental investigations for surface roughness and dimensional accuracy of FDM components with barrel finishing. *Proce Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, Vol. 87, №3, 2017. pp. 455–463.

87. Sood A. K., Mahapatra S. S. and Ohdar R. K. Weighted principal component approach for improving surface finish of ABS plastic parts built through fused deposition modelling process. *International Journal of Rapid Manufacturing*, Vol. 2, №1/2, 2011. pp. 445–458.

88. Tamburrino F., Barone S., Paoli A. and Rationale A. V. Post-processing treatments to enhance additively manufactured polymeric parts: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 16, №2, 2021 pp. 218–251.

89. Zhang P., Liu Z., Du J., Su, G., Zhang J. and Xu, C. On machinability and surface integrity in subsequent machining of additively-manufactured thick coatings: a review. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 53, 2020 pp. 123–143.

90. Boschetto A., Bottini L., Veniali F. Finishing of Fused Deposition Modeling parts by CNC machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Vol. 41. 2016. pp. 92–101.

91. М.М. Заблоцький, Заболотний О.В. Методи обробки складних форм деталей на фрезерних верстатах з ЧПУ. *Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій* – Тернопіль 17-18 листопада 2016. С. 199.

92. Особливості фрезерної обробки деталей з просторово-складними поверхнями [Електронний ресурс]. *Погляд у майбутнє приладобудування*. №12. 2019. Режим доступу до ресурсу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/27843>.

93. ПЕТРАКОВ, Юрій Володимирович; МАЦКІВСЬКИЙ, О. С. Моделювання фрезерування кінцевими фрезами. 2015. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування No1 (73)*. 2015. С. 78-83.

94. Юмашев, В. Є., & Штегін, О. О. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОСТІЙНОЇ ШОРСТКОСТІ ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ 3D-ПОВЕРХОНЬ СФЕРИЧНИМИ КІНЦЕВИМИ ФРЕЗАМИ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПУ. *Вісник ЖДТУ. Серія "Технічні науки"*, 1(2(53)). 2016. С.56-61.

95. Петраков Ю. В., Луценко М .О. Врахування нестационарності процесу різання при розробці систем автоматизації програмування обробки 3D-поверхонь на фрезерних верстатах з ЧПУ. *Міжвузівський збірник (за напрямом "Інженерна механіка")*. Випуск 9. Луцьк 2001. С. 217–224.

96. КОРОТКОВ, В. С. ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ СКЛАДНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ. In: *The 9 th International scientific and*

*practical conference “Modern research in world science” (November 28-30, 2022)*  
*SPC “Sci-conf. com. ua”, Lviv, Ukraine. 2022. 1977 p. 2022. p. 502.*

97. Петраков Ю. В. Писаренко В. В., Мацківський О. С. Напрями розвитку САМ-систем. *Журнал інженерних наук*. 2015. Т. 2, № 2. С. А7-А13.

98. Kuan-Hua Chang. Machining Simulation Using SOLIDWORKS CAM. 2021. 347 p.

99. Муляр Ю. І. Програмування багатоінструментальної обробки на верстатах з ЧПК. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2006. 192 с.

100. Jerard R., Fussell B., Ercan M. On-line Optimization of Cutting Conditions for NC Machining // Manufacturing & Industrial Innovation Research Conference, Tampa, Florida, 2011.

101. Кушнірчук А. С. Аналіз та вибір стратегії чистової та чорнової обробки елементів заготовок складної геометричної форми у SolidCAM. *Materials of the XIV International Scientific and Practical Conference «INTERNATIONAL FORUM: PROBLEMS AND SCIENTIFIC SOLUTIONS»*. January 16-18, 2025. Melbourne, Australia. С. 291-302

102. Кушнірчук А. С. Оптимізація конструкції деталей машин для ефективного адитивного виробництва за допомогою SOLIDWORKS SIMULATION. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. №6. 2024. С. 497–502.

103. 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.

104. Скіцько І. Ф, Скіцько О. І. Обробка результатів фізичних вимірювань. [Електронний ресурс]: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 88 с.

105. Ладанюк А. П. Методологія наукових досліджень : навч. посіб. / А. П. Ладанюк, Л. О. Власенко та ін. - Київ : Ліра-К, 2018. С. 227–230.

106. 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*, 2021. pp. 85–106.
107. 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, 2022. pp. 358–369.
108. 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.
109. Кушнірчук А. С., Ткачук В. П. Фрезерування деталей отриманих FDM друком. *XII Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні технології у машинобудуванні ATME-2024»*, Івано- Франківськ - Яремче, 5-9 лютого 2024 р. С. 138–139.
110. Кушнірчук А. С., Ткачук В. П. Механічна обробка деталей отриманих FDM друком. *X 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.
111. 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.
112. Bellini A., Gucerı S., Mechanical characterization of parts fabricated using Fused Deposition Modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 9, 2003, pp. 252–264.
113. Charles Dapogny, Rafael Estevez, Alexis Faure, Georgios Michailidis. 2019. Shape and topology optimization considering anisotropic features induced by

additive manufacturing processes. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 344, pp. 626–665.

114. Hardikkumar Prajapati, Darshan Ravoori, Robert L. Woods, Ankur Jain. Measurement of anisotropic thermal conductivity and inter-layer thermal contact resistance in polymer fused deposition modeling (FDM). *Additive Manufacturing*. 21, 2018. pp. 84–90.

115. Cesar Omar Balderrama-Armendariz, Eric MacDonald, David Espalin, David Cortes-Saenz, Ryan Wicker, Aide MaldonadoMacias. 2018. Torsion analysis of the anisotropic behavior of FDM technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 96. №1-4, 2018. pp.307–317.

116. 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.

117. 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.

118. Zhang Y., Chou K. A parametric study of part distortions in fused deposition modelling using three-dimensional finite element analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B : Journal of Engineering Manufacture*. V. 222(8). 2008. pp. 959–967.

119. Ghaffar, S. H.; Corker, J.; Fan, M. Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. *Autom. Constr.* 93, 2018. pp. 1–11. [Google Scholar] [CrossRef].

120. Bose, S.; Ke, D.; Sahasrabudhe, H.; Bandyopadhyay, A. Additive manufacturing of biomaterials. *Prog. Mater. Sci.* 93, 2018 pp. 45–111. [Google Scholar] [CrossRef].

121. 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, 2022. pp. 358–369.

122. 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*, 60, 2017. pp. 229–234. [Google Scholar] [CrossRef].

123. Cazon, A., Morer, P. and Matey, L. PolyJet technology for product prototyping: tensile strength and surface roughness properties, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 228, №12, 2014. pp. 1664–1675.

124. Horvath, D., Noorani, R. and Mendelson, M. Improvement of surface roughness on ABS 400 polymer using design of experiments (DOE). *Materials Science Forum*, Vol. 561/565, 2007. pp. 2389-2392.

125. Michael, K., Servos, M., Stief, P., Dantan, J., Etienne, A. And Siadat, A. On achieving accuracy and efficiency in additive manufacturing: requirements on a hybrid CAM system, 2018.

126. Pérez, M., Medina-Sanchez, G., García-Collado, A., Gupta, M. and Carou, D. Surface quality enhancement of fused deposition modeling (FDM) printed samples based on the selection of critical printing parameters, *Materials*, Vol. 11, № 8, 2018.

127. Polzin, C., Spath, S. and Seitz, H. Characterization and evaluation of a PMMA-based 3D printing process, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 19. № 1, 2013. pp. 37–43.

128. Sood, A. K., Mahapatra, S. S. and Ohdar, R. K. Weighted principal component approach for improving surface finish of ABS plastic parts built through fused deposition modelling process. *International Journal of Rapid Manufacturing*, Vol. 2, № 1/2, 2011. pp. 445–458.

129. Полюшко В., Єрошенко А. Проведення топологічної оптимізації кронштейна та підготовки до 3D-друку. *Технічні науки та технології*. № 3 (21). 2020. С. 79–88.

130. Кушнірчук А. С., Ткачук В. П. Аналіз впливу режимів різання на точність розмірів поверхонь деталей, виготовлених FDM друком, що оброблюються тошінням та фрезеруванням з урахуванням їх пружних деформацій. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. №3. 2024. С. 451–460.

131. 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.

## ДОДАТКИ

Додаток А

### СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

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.
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.
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
4. Кушнірчук А. С. Оптимізація конструкції деталей машин для ефективного адитивного виробництва за допомогою SOLIDWORKS SIMULATION. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. №6. 2024. С. 497-502.
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.



*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

6. Кушнірчук А. С. Адитивні технології в ливарному виробництві. : тези доповідей *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*, 26–27 травня 2022 р. м. Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка». 2022. Т. 1. С. 105-106.

7. Кушнірчук А. С. Установка для дослідження на зносостійкість тіл отриманих FDM друком. : тези доповідей *The 9th International scientific and practical conference “Modern research in world science”*, November 28-30, 2022. Lviv, Ukraine. 2022. P. 506-509.

8. Кушнірчук А. С., Ткачук В. П. Механічна обробка деталей отриманих FDM друком. : тези доповідей *X 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.

9. Кушнірчук А. С. Аналіз геометричної точності після механічної обробки деталей отриманих FDM друком. : тези доповідей *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.*

10. Кушнірчук А. С., Ткачук В. П. Фрезерування деталей отриманих FDM друком. : тези доповідей *XII Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні технології у машинобудуванні ATME-2024»*, Івано- Франківськ - Яремче, 5-9 лютого 2024 р. С. 138-139.

11. Кушнірчук А. С. Аналіз та вибір стратегії чистової та чорної обробки елементів заготовок складної геометричної форми в SolidCAMthe. *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 чистової та чорнової обробки елементів заготовок складної геометричної форми у SolidCAM.*



**БДЖІЛКА ПВКФ**  
обладнання для лиття пластмас

м. Хмельницький, вул. 3-я Нова, 70/1  
[www.gesal.com.ua](http://www.gesal.com.ua)

### ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор приватно виробничо-комерційної

фірми «БДЖІЛКА»

*М. В. ГЕСАЛЬ*  
М. В. ГЕСАЛЬ  
«18» грудня 2024  
М.П. БДЖІЛКА  
21342383

м. Хмельницький

### АКТ

передачі результатів дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня доктора філософії Кушнірчука Андрія Сергійовича.

Комісія у складі: голови – директора приватно виробничо-комерційної фірми «БДЖІЛКА» М. В. ГЕСАЛЯ; членів комісії: директор з виробництва Слюсарь А.П., склала цей акт про те, що результати наукових досліджень по дисертаційній роботі Кушнірчука А. С. за темою «Технологічне забезпечення якості деталей машин, отриманих 3D друком» передані виробничо-комерційній фірмі «БДЖІЛКА» і прийняті для використання та впровадження.

Зокрема із теоретичних та практичних результатів роботи було використано:

- Результати аналітичного аналізу по вибору необхідних режимів для точіння та фрезерування заготовок на чорнових та чистових операціях, виготовлених 3D друком;
- результати експериментальних досліджень величини зношування пар тертя, отриманих за допомогою FDM друку із ABS та COPET пластику.
- результати топологічної оптимізації за допомогою адитивних технологій у SolidWorks, що дозволяє отримати кінцевий продукт без потреби в додатковій обробці. 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 механічної обробки.

Голова комісії:

*М. В. ГЕСАЛЬ*  
М.В. ГЕСАЛЬ

Члени комісії:

*А. П. СЛЮСАРЬ*  
А.П. СЛЮСАРЬ

Комерційний відділ

Реквізити

тел/факс: +38 0382 78-51-85  
e-mail: 21342383@mail.gov.ua

р/р: UA473052990000026009046001302  
в АТ КБ "ПРИВАТБАНК"  
ІПН 213423822258, Код ЄДРПОУ 21342383

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Cp=	82				Pz=	246,28353	Kmp=1
2	X=	0,75						
3	Y=	0,6						
4								
5	u=	1						
6	q=	0,86						
7	w=	0						
8	B=	10						
9	D=	10						
10								
11	Al	Kmp=	1					
12	Steel	Kmp=	0,3					
13	Cfst iron	Kmp=	1					
14								
15	t	Sz	Z	n				
16	0,5	0,03	3	400				
17	1	0,1	4	600				
18	1,5	0,2		1000				
19	2	0,3		1400				
20	t, мм	Sz, мм/об	Z, од	n, об/хв				
21								
22								
23	E=	1,4	1400					
24		1,5	1500					
25		1,6	1600					
26		1,7	1700					
27		1,8	1800					
28		1,9	1900					
29		2	2000					

Рис. С1. Вихідні данні для розрахунку сили різання при фрезеруванні

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
t	Kmp=1	PV=0,9Pz	Pv(t,Sz=0,03,Z=3,n=400)	Pv(t,Sz=0,1,Z=3,n=400)	Pv(t,Sz=0,2,Z=3,n=400)	Pv(t,Sz=0,3,Z=3,n=400)	Pv(t,Sz=0,03,Z=4,n=400)	Pv(t,Sz=0,1,Z=4,n=400)	Pv(t,Sz=0,2,Z=4,n=400)	Pv(t,Sz=0,3,Z=4,n=400)		E=1400МПа
0,5			54,64752	112,53761	170,57512	217,55569	72,86336	150,05015	227,43349	290,07425		E=1500МПа
1			77,28326	159,15221	241,22965	307,67020	103,04435	212,20295	321,63953	410,22694		E=1600МПа
1,5			94,65228	194,92086	295,44477	376,81750	126,20304	259,89448	393,92637	502,42334		E=1700МПа
												E=1800МПа
												E=1900МПа
												E=2000МПа
E	Δl											
1400			39,03394	80,38401	121,83937	155,39692	52,04526	107,17868	162,45250	207,19589		
			55,20233	113,68015	172,30689	219,76443	73,60311	151,57354	229,74252	293,01924		
			67,60877	139,22918	211,03198	269,15536	90,14503	185,63891	281,37598	358,87381		
1500			36,43168	75,02507	113,71675	145,03712	48,57557	100,03343	151,62233	193,38283		
			51,52217	106,10148	160,81977	205,11347	68,69623	141,46863	214,42635	273,48463		
			63,10152	129,94724	196,96318	251,21167	84,13536	173,26299	262,61758	334,94889		
1600			34,15470	70,33601	106,60945	135,97230	45,53960	93,78134	142,14593	181,29641		
			48,30204	99,47013	150,76853	192,29388	64,40272	132,62685	201,02471	256,39184		
			59,15767	121,82554	184,65298	235,51094	78,87690	162,43405	246,20398	314,01459		
1700			3,21456	6,61986	10,03383	12,79739	4,28608	8,82648	13,37844	17,06319		
			4,54607	9,36189	14,18998	18,09825	6,06143	12,48253	18,91997	24,13100		
			5,56778	11,46593	17,37910	22,16574	7,42371	15,28791	23,17214	29,55431		
1800			30,35973	62,52089	94,76396	120,86427	40,47964	83,36119	126,35194	161,15236		
			42,93514	88,41790	134,01647	170,92789	57,24686	117,89053	178,68863	227,90385		
			52,58460	108,28937	164,13599	209,34306	70,11280	144,38582	218,84798	279,12408		
1900			28,76185	59,23032	89,77638	114,50299	38,34914	78,97376	119,70184	152,67066		
			40,67540	83,76432	126,96297	161,93169	54,23387	111,68576	169,28396	215,90891		
			49,81699	102,58993	155,49725	198,32500	66,42265	136,78657	207,32967	264,43334		
2000			27,32376	56,26881	85,28756	108,77784	36,43168	75,02507	113,71675	145,03712		
			38,64163	79,57611	120,61482	153,83510	51,52217	106,10148	160,81977	205,11347		
			47,32614	97,46043	147,72239	188,40875	63,10152	129,94724	196,96318	251,21167		

Рис. С2. Результати розрахунку сили різання та пружних відтискань при фрезеруванні зі змінними параметрами режиму різання

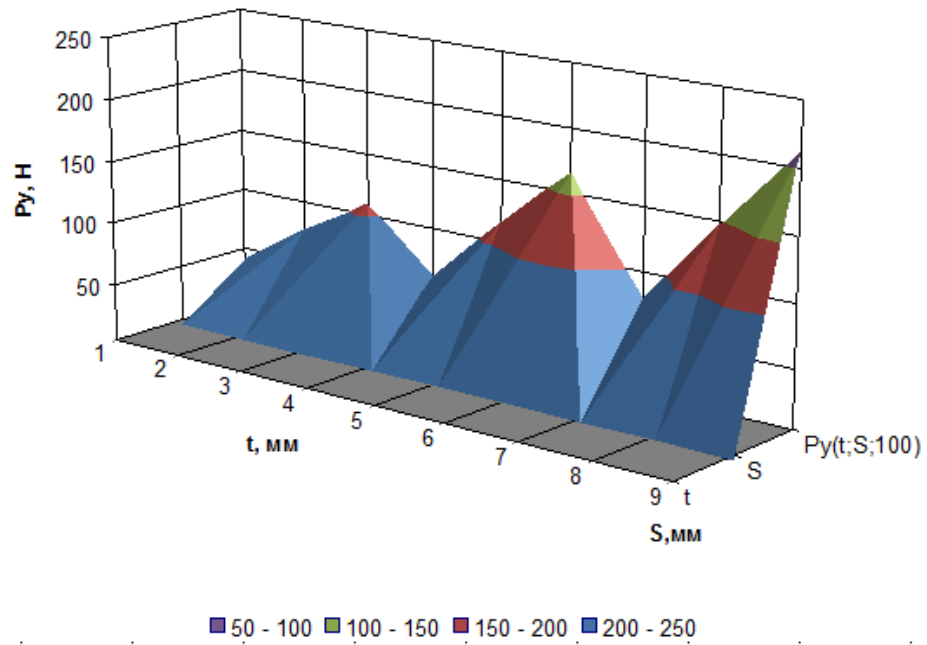


Рис. С3. Діаграма залежності сили різання при фрезеруванні від різних параметрів режимів різання

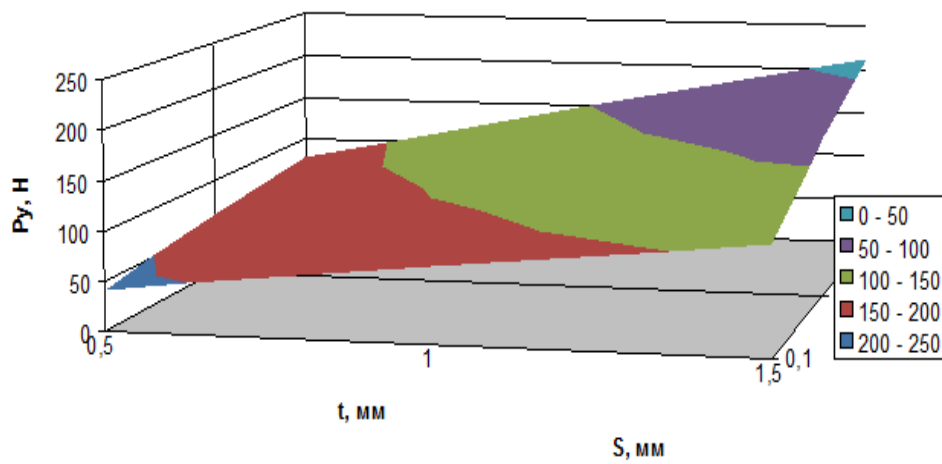


Рис. С4. Діаграма залежності сили різання при фрезеруванні від подачі та глибини різання

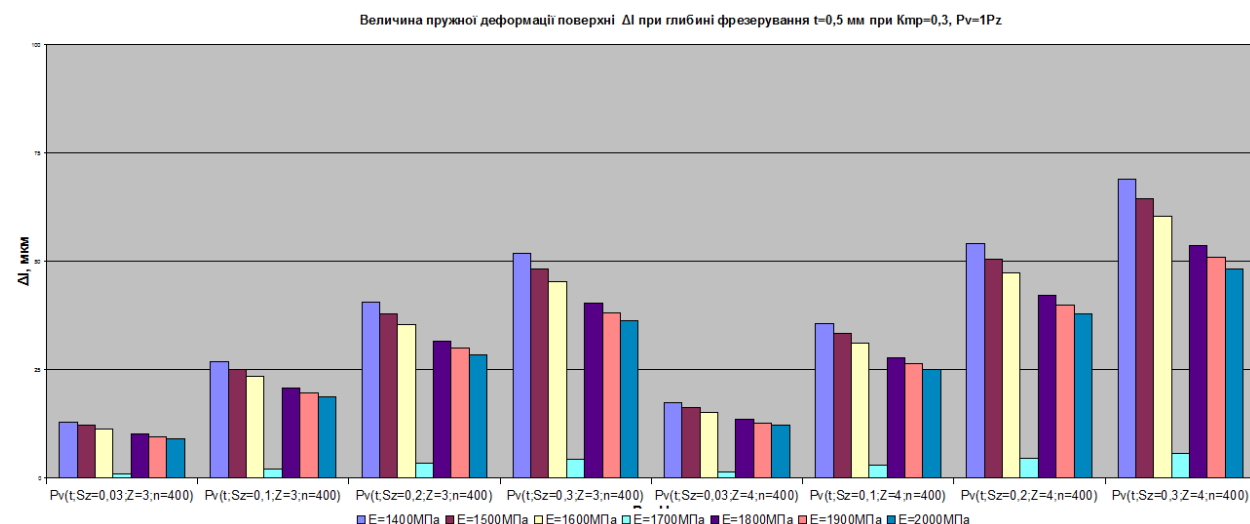


Рис. С5. Діаграма зміни величини пружної деформації поверхні заготовки  $\Delta l$  при черновому фрезеруванні при  $t = 0,5$  мм з різними подачами  $S_z$  та обертами фрези  $n$  при змінному модулю повздовжньої пружності  $E$  при кількості зібців фрези  $Z = 3$  та  $Z = 4$  ( $K_{mp} = 0,3$ ;  $P_v = P_z$ )

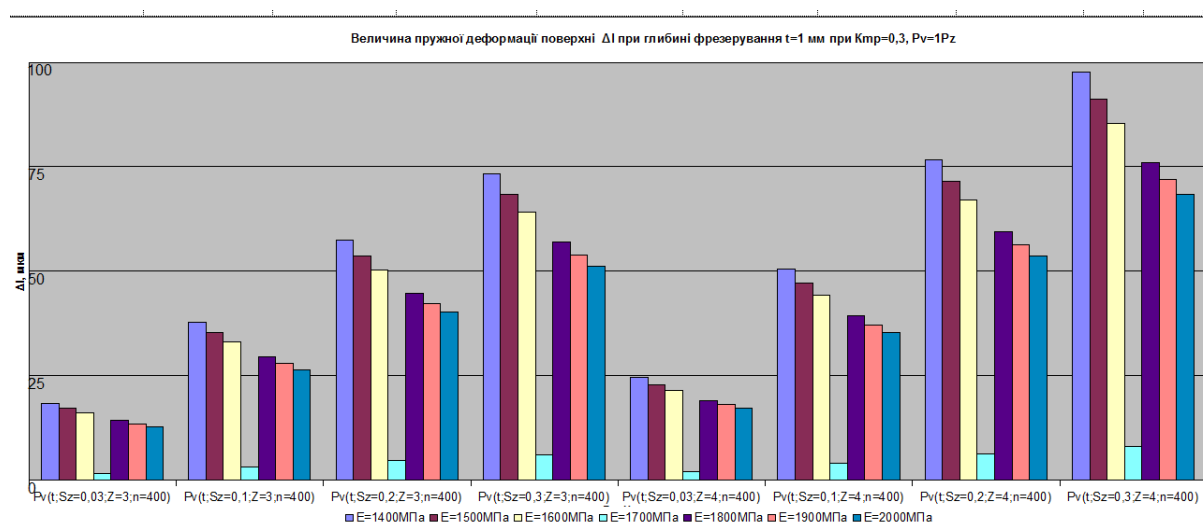


Рис. С6. Діаграма зміни величини пружної деформації поверхні заготовки  $\Delta l$  при черновому фрезеруванні при  $t = 1$  мм з різними подачами  $S_z$  та обертами фрези  $n$  при змінному модулю повздовжньої пружності  $E$  при кількості зібців фрези  $Z = 3$  та  $Z = 4$  ( $K_{mp} = 0,3$ ;  $P_v = P_z$ )

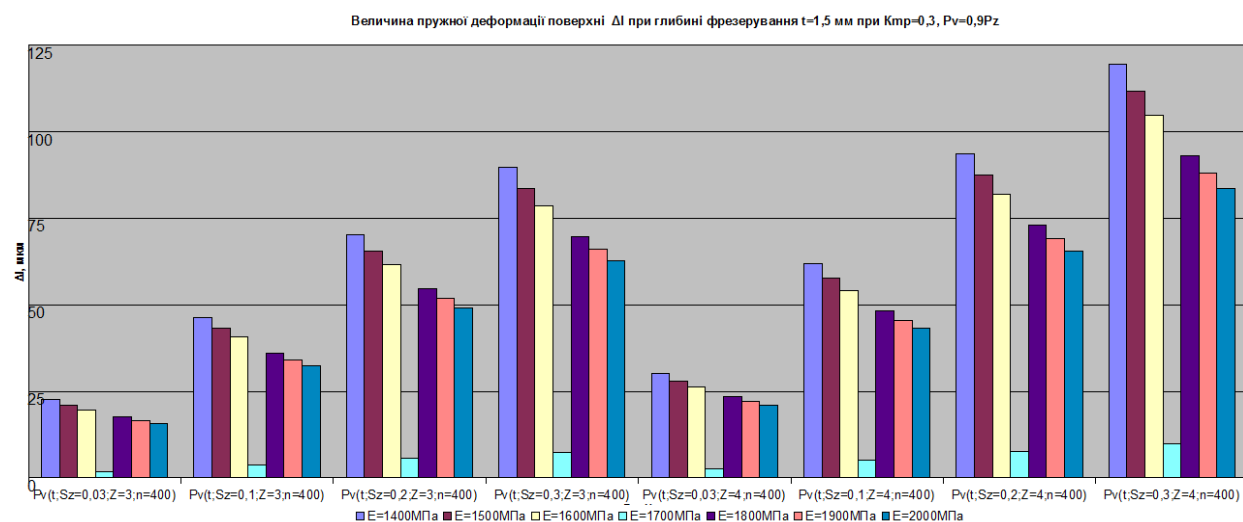


Рис. С7. Діаграма зміни величини пружної деформації поверхні заготовки  $\Delta l$  при черновому фрезеруванні при  $t = 1,5$  мм з різними подачами  $S_z$  та обертами фрези  $n$  при змінному модулю повздовжньої пружності  $E$  при кількості зібців фрези  $Z = 3$  та  $Z = 4$  ( $K_{mp} = 0,3$ ;  $P_v = P_z$ )

1				
2	$C_p=$	35,5		
3	$X=$	0,6		
4	$Y=$	0,8		
5	$n=$	-0,3		
6	$K_p=$	1		
7				
8				
9	$t$	$S$	$V$	
10	0,5	0,1	100	
11	1	0,2	200	
12	1,5	0,3	300	
13				

Рис. С8. Вихідні данні для розрахунку сили різання при обточуванні

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
t		Py(t;S=0,1;V=100)	Py(t;S=0,2;V=100)	Py(t;S=0,3;V=100)	Py(t;S=0,1;V=200)	Py(t;S=0,2;V=200)	Py(t;S=0,3;V=200)	Py(t;S=0,1;V=300)	Py(t;S=0,2;V=300)	Py(t;S=0,3;V=300)		E=1400МПа
0,5		40,91272	62,01209	79,09174	33,23146	50,36947	64,24245	29,42537	44,60053	56,88461		E=1500МПа
1		76,34584	115,71865	147,59040	62,01209	93,99275	119,88066	54,90969	83,22753	106,15043		E=1600МПа
1,5		109,96830	166,68077	212,58874	89,32201	135,38686	172,67571	79,09174	119,88066	152,89873		E=1700МПа
												E=1800МПа
												E=1900МПа
												E=2000МПа
E	Δl											
1400		29,22337	44,29435	56,49410	23,73675	35,97819	45,88747	21,01812	31,85752	40,63186		
		54,53274	82,65618	105,42172	44,29435	67,13768	85,62904	39,22121	59,44823	75,82173		
		78,54878	119,05769	151,84910	63,80144	96,70490	123,33979	56,49410	85,62904	109,21338		
1500		27,27515	41,34139	52,72783	22,15430	33,57965	42,82830	19,61692	29,73368	37,92307		
		50,89723	77,14577	98,39360	41,34139	62,66184	79,92044	36,60646	55,48502	70,76695		
		73,31220	111,12051	141,72583	59,54801	90,25790	115,11714	52,72783	79,92044	101,93249		
1600		25,57045	38,75756	49,43234	20,76966	31,48092	40,15153	18,39086	27,87533	35,55288		
		47,71615	72,32416	92,24400	38,75756	58,74547	74,92541	34,31856	52,01720	66,34402		
		68,73019	104,17548	132,86796	55,82626	84,61678	107,92232	49,43234	74,92541	95,56171		
1700		24,06631	36,47770	46,52455	19,54792	29,62910	37,78968	17,30904	26,23560	33,46153		
		44,90932	68,06980	86,81789	36,47770	55,28985	70,51804	32,29982	48,95737	62,44143		
		64,68723	98,04751	125,05220	52,54236	79,63933	101,57395	46,52455	70,51804	89,94043		
1800		22,72929	34,45116	43,93986	18,46192	27,98304	35,69025	16,34743	24,77807	31,60256		
		42,41435	64,28814	81,99467	34,45116	52,21820	66,60037	30,50538	46,23752	58,97246		
		61,09350	92,60043	118,10486	49,62334	75,21492	95,93095	43,93986	66,60037	84,94374		
1900		21,53301	32,63794	41,62723	17,49024	26,51025	33,81182	15,48704	23,47396	29,93927		
		40,18202	60,90455	77,67916	32,63794	49,46987	63,09508	28,89984	43,80396	55,86865		
		57,87805	87,72672	111,88881	47,01159	71,25624	90,88195	41,62723	63,09508	80,47302		
2000		20,45636	31,00605	39,54587	16,61573	25,18473	32,12123	14,71269	22,30026	28,44230		
		38,17292	57,85933	73,79520	31,00605	46,99638	59,94033	27,45485	41,61376	53,07521		
		54,98415	83,34039	106,29437	44,66101	67,69343	86,33786	39,54587	59,94033	76,44937		

Рис. С9. Розрахунок сили різання та величини пружних відтискань при обточуванні зі змінними параметрами режиму різання

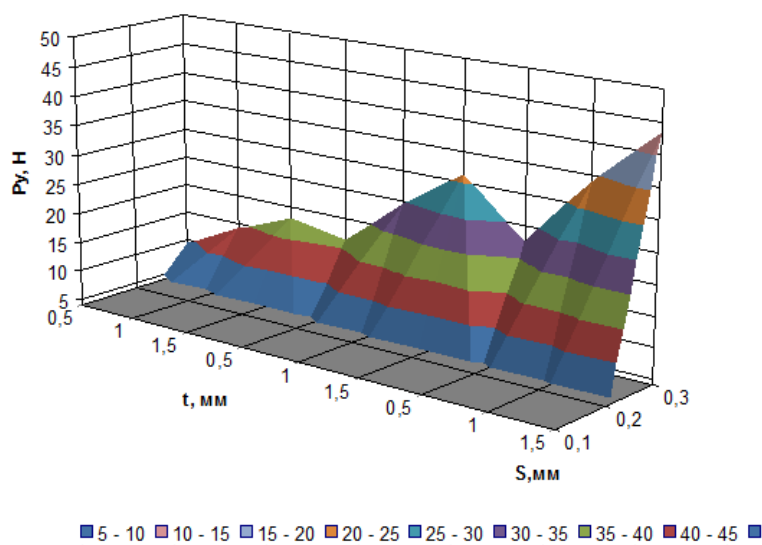


Рис. С10. Результати розрахуку сили різання при обточуванні зі змінними параметрами режиму різання глибини та подачі