

КУШНІРЧУК АНДРІЙ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5445-7378>e-mail: kyshnir98@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА ЗА ДОПОМОГОЮ SOLIDWORKS SIMULATION

Для ефективного моделювання деталей в CAD системах можуть допомогти методи генеративного (топонімічного) проектування. Топологічна оптимізація та адитивні технології дозволяють отримати кінцевий продукт без потреби в додатковій обробці. У статті розглянуто застосування інструментів дослідження топології (Topology Optimization) для вдосконалення процесу 3D-друку пластмасових виробів. Висвітлено методи та підходи до створення оптимальних геометричних конфігурацій, що забезпечують максимальну міцність та ефективність виробу. Основні аспекти дослідження включають встановлення початкових умов і обмежень, визначення оптимальної топології для мінімізації ваги або покращення функціональних характеристик продукту та інтерпретацію отриманих результатів. Завдяки дослідженню топології вдосконалено параметри виробу та процес 3-D друку пластмасових виробів, а саме маса виробу зменшилася на 50,7%, а терміни виготовлення деталі за технологією FDM друку скоротилися на 53,7%.

Ключові слова: метод генеративного проектування, оптимізація форми деталі, мінімізація маси.

KUSHNIRCHUK ANDRIY

Khmelnytskyi National University

OPTIMIZATION OF MACHINE PARTS DESIGN FOR EFFECTIVE ADDITIVE MANUFACTURING USING SOLIDWORKS SIMULATION

Additive technologies have significantly improved the processes of creating complex-shaped structures with less weight and more efficient use of material. 3-D printing removes many restrictions on the shape of the product, which are present, for example, during the mechanical processing of parts on machine tools. The purpose of the work is to detail the features of using modern software tools, such as Solidworks Simulation, which will allow you to effectively integrate topology optimization into the 3D printing process, which helps to improve the quality of product design, its weight characteristics, reduce manufacturing time and production costs. Generative (toponymic) design methods can help for effective modeling of parts in CAD systems. Topological optimization and additive technologies allow you to obtain the final product without the need for additional processing. The article considers the use of topology research tools (Topology Optimization) to improve the 3D printing process of plastic products. Methods and approaches to creating optimal geometric configurations that ensure maximum product strength and efficiency are highlighted. The main aspects of the study include establishing initial conditions and constraints, determining the optimal topology to minimize weight or improve product functionality, and interpreting the results. Using modern software tools such as Solidworks Simulation, engineers can effectively integrate topology optimization into the 3D printing process, which helps improve quality and reduce production costs. The topology study improved product parameters and the 3D printing process for plastic products, namely, the weight of the product decreased by 50.7%, and the time to manufacture the part using FDM printing technology decreased by 53.7%.

Keywords: generative design method, optimization of part shape, mass minimization.

Постановка проблеми

За допомогою адитивних технологій значно вдосконалились процеси створення конструкцій складної форми з меншою вагою і ефективнішим використанням матеріалу. 3-D друк знімає багато обмежень щодо форми виробу, які присутні наприклад при механічній обробці деталей на верстатах. Для ефективного моделювання деталей в CAD системах можуть допомогти методи генеративного (топонімічного) проектування. 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.

Аналіз останніх публікацій

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, необхідна шорсткість, характеристики міцності матеріалу, дизайн форми з мінімізацією маси деталі.

Автори [1-5] займалися технологіями адитивного виробництва, проектуванням заготовок у адитивному виробництві для багато-осьового моделювання та параметричним дослідженням спотворень деталей у моделюванні наплавлення з використанням тривимірного аналізу кінцевих елементів. Багато дослідників [6-8] присвятили дослідження вивченню міцності матеріалів на розрив і властивостей шорсткості поверхні, деталей отриманих 3-D друком, та досягнення точності і ефективності процесу друку. Покращенню якості поверхні моделюванням плавленого осадження (FDM) на основі друкованих зразків та вибору критичних параметрів друку присвячені роботи [9-11]. Для ефективного моделювання деталей в CAD системах

можуть допомогти методи генеративного (топонімічного) проектування. Топологічна оптимізація та адитивні технології дозволяють отримати кінцевий продукт без потреби в додатковій обробці [12-13].

Формулювання цілей статті

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

Виклад основного матеріалу

Згідно геометричних вимог, та взаємного розташування елементів конструкції виконано моделювання деталі «Кронштейн» в системі SOLIDWORKS (рис.1). Функціональні властивості деталі забезпечені, але форма виробу призведе до не виправданої витрати матеріалу при виготовленні FDM друку. Використання методів генеративного проектування 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. Початковим етапом є задання властивостей матеріалу, визначення ступені 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.

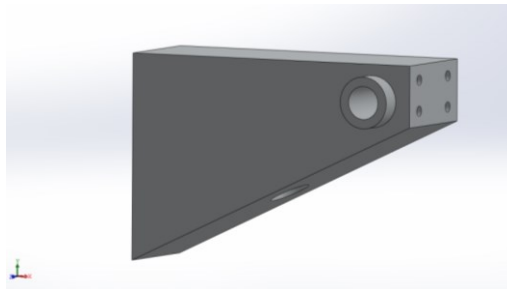


Рис. 1. 3-D Модель деталі «Кронштейн»

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 розтяг від правого торця – 3 Н. (Рис. 2.).

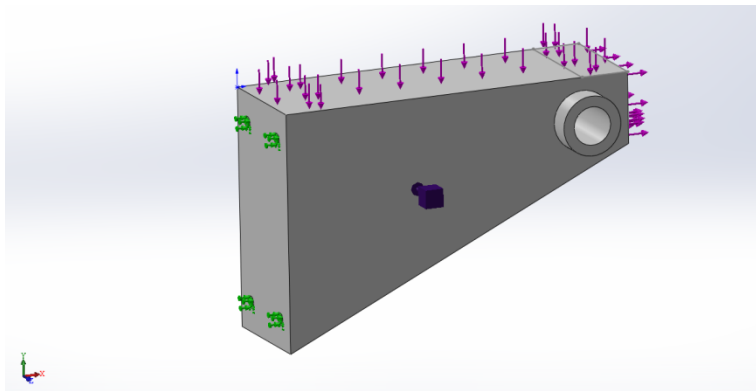


Рис. 2. Схема закріплення деталі і поверхні де прикладене навантаження

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. При цьому є можливість вказувати глибину на

яку матеріал має бути збережений навколо обраних елементів, це зручно використовувати коли виріб матиме припуск на механічну обробку 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. 3.), і вказуємо глибину збереження матеріалу – 3 мм.

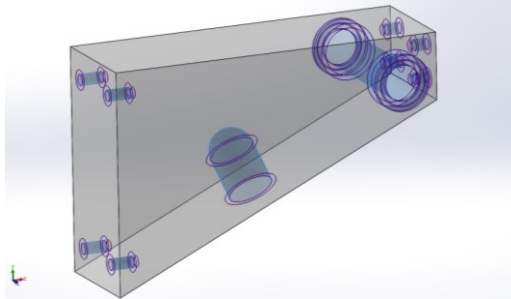


Рис. 3. Елементи моделі які будуть збережені при оптимізації

Для запуску виконання генеративного дизайну залишилось вказати цілі дослідження і обмеження. В 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 PropertyManager обираємо одну з наступних цілей оптимізації:

- Найкраще відношення жорсткості до маси;
- Гранично зменшити масу;
- Гранично зменшити максимальне зміщення.

Якщо, як ціль, вибрано значення найкраще 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 проект симетричним відносно зазначеної площини. До оптимізованого проекту можна застосувати половину, чверть або одну восьму площинної симетрії.

На рис. 4 показаний приклад половинної симетрії, таке обмеження найкраще підійде для нашої деталі.



Рис. 4. Оптимізована конструкція балки з обмеженням половинної симетрії

Розпочинаємо розрахунок, а результатом є оптимізована топологія у формі полігональної сітки з графічним зображенням, що показує, які ділянки можна видалити, а які потрібно залишити (рис. 5).

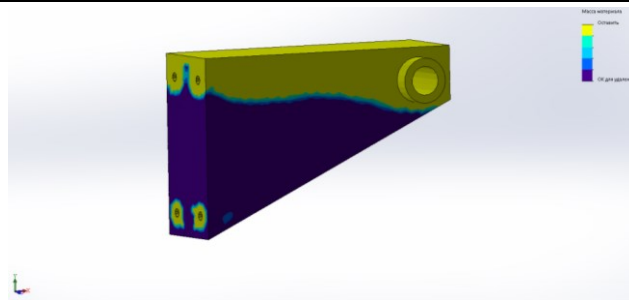


Рис. 5. Модель після виконання аналізу

Жовтим кольором позначено області які потрібно зберегти, синім – області дозволені для видалення згідно розрахунку. Використовуючи повзунок зліва (рис. 6) 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. 7)

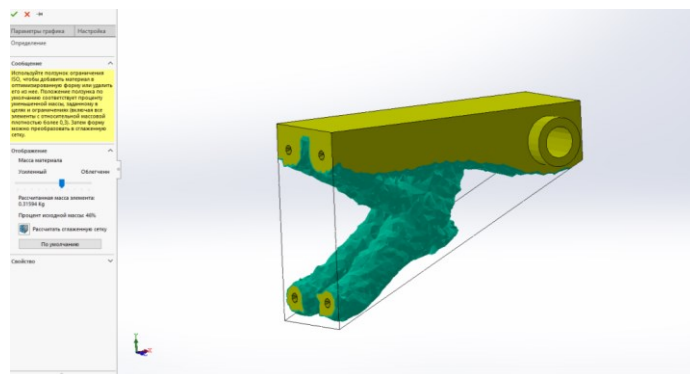


Рис. 6. Оптимізована модель деталі

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 3-D друку в спеціальній програмі - слайсері.

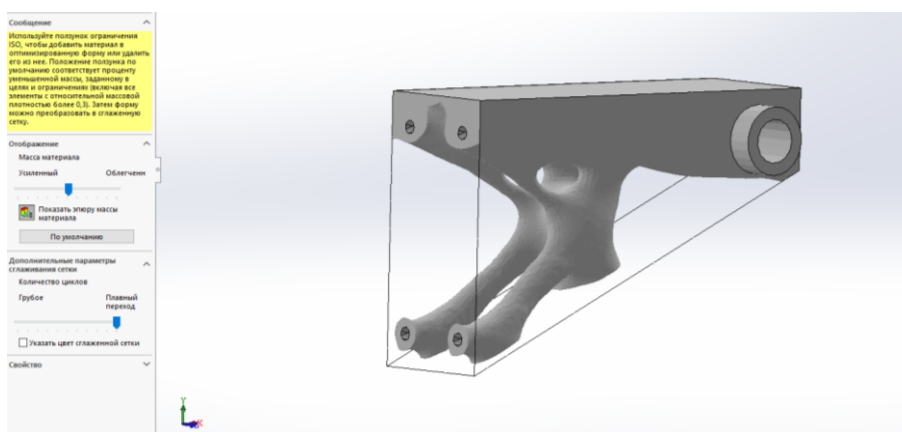


Рис. 7. Модель деталі у вигляді згладженої сітки

Виконуємо порівняння оригінальної та оптимізованої моделі під час підготовки до 3-D 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°).

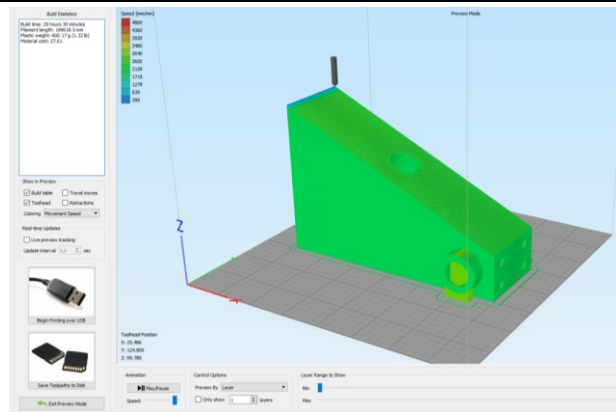


Рис. 8. Підготовка до друку оригінальної моделі

Результати слайсінгу (підготовка G-коду) показали такі данні: для оригінальної моделі (рис. 8) 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. 9).

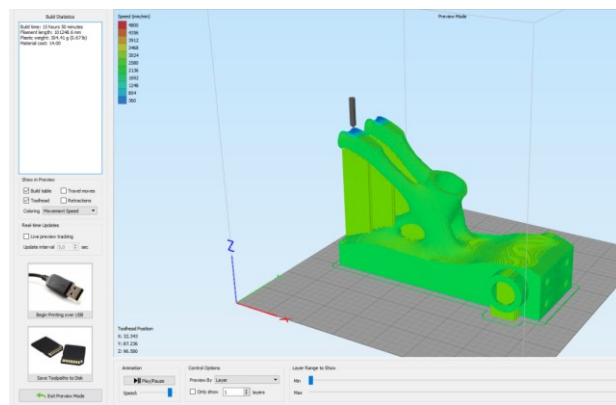


Рис. 9. Підготовка до друку оптимізованої моделі

Висновки

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 лиття чи обробки тиском. Виготовлення складних прес-форм часто потребує додаткової обробки 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 додатковій обробці. 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 механічної обробки.

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

Література

1. 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.
2. 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.
3. Bose, S.; Ke, D.; Sahasrabudhe, H.; Bandyopadhyay, A. Additive manufacturing of biomaterials. *Prog. Mater. Sci.* 93, 2018 pp. 45–111.
4. Kuruoğlu Y, Akgün M & Demir H. Modelling and optimization of surface roughness and tensile strength of ABS, PLA and PETG samples produced by FDM method. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, Vol. 6, Issue 3, 2022. pp. 358-369.
5. Wulle, F.; Coupek, D.; Schäffner, F.; Verl, A.; Oberhofer, F.; Maier, T. Workpiece and Machine Design in Additive Manufacturing for Multi-Axis Fused Deposition Modeling. *Procedia CIRP*, 60, 2017. pp. 229–234.
6. 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.

7. 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.
8. 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. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.265.
9. 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. doi: 10.3390/ma11081382.
10. 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.
11. 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.
12. Полюшко В., Єрошенко А. Проведення топологічної оптимізації кронштейна та підготовки до 3D-друку. *Технічні науки та технології*. № 3 (21). 2020. С. 79-88.
13. Topology Study. URL: https://help.solidworks.com/2024/English/SolidWorks/cworks/c_generative_design_study.htm?id=304aced1ca164c45b4c050de499ad8a6#Pg0.

References

1. 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.
2. 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.
3. Bose, S.; Ke, D.; Sahasrabudhe, H.; Bandyopadhyay, A. Additive manufacturing of biomaterials. *Prog. Mater. Sci.* 93, 2018 pp. 45–111.
4. Kuruoğlu Y, Akgün M & Demir H. Modelling and optimization of surface roughness and tensile strength of ABS, PLA and PETG samples produced by FDM method. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, Vol. 6, Issue 3, 2022. pp. 358-369.
5. Wulle, F.; Coupek, D.; Schäffner, F.; Verl, A.; Oberhofer, F.; Maier, T. Workpiece and Machine Design in Additive Manufacturing for Multi-Axis Fused Deposition Modeling. *Procedia CIRP*, 60, 2017. pp. 229–234.
6. 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.
7. 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.
8. 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. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.265.
9. 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. doi: 10.3390/ma11081382.
10. 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.
11. 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.
12. Polyushko V., Yeroshenko A. Carrying out topological optimization of the bracket and preparation for 3D printing. *Technical Sciences and Technologies*. №3 (21). 2020. pp. 79-88.
13. Topology Study. URL: https://help.solidworks.com/2024/English/SolidWorks/cworks/c_generative_design_study.htm?id=304aced1ca164c45b4c050de499ad8a6#Pg0.