Слободяник Валентина, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри мультимедійних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6982-7194

Данко Любомир, здобувач другого рівня вищої освіти, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2470-6679

Голубник Тетяна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри мультимедійних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8325-9813

Slobodianyk Valentyna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Multimedia Technologies, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, https://orcid.org/0000-0001-6982-7194

Danko Liubomyr, Master's Degree Student at Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, https://orcid.org/0009-0001-2470-6679

Holubnyk Tetyana, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Multimedia Technologies, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, https://orcid.org/0000-0002-8325-9813

ПРОЄКТУВАННЯ ПАРАМЕТРИЧНОЇ 3D-МОДЕЛІ КРОНШТЕЙНА ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЇ FDM-ДРУКУ

DEVELOPMENT OF A PARAMETRIC 3D MODEL OF A BRACKET FOR FDM PRINTING

Анотація

Статтю присвячено дослідженню особливостей проєктування параметричних 3D-моделей виробів для технології FDM-друку на прикладі функціонального кронштейна. Розглянуто сучасні підходи до параметричного моделювання в системах автоматизованого проєктування та проаналізовано їх значення для підготовки виробів до адитивного виготовлення. Визначено основні конструктивні вимоги до моделей, призначених для пошарового формування методом екструзії термопластичних матеріалів. У роботі виконано розроблення параметричної 3D-моделі кронштейна у програмному середовищі SolidWorks, досліджено основні етапи створення цифрової моделі та проведено аналіз її геометричних характеристик. Особливу увагу приділено підготовці моделі до адитивного виробництва шляхом експорту у формат STL та перевірці її придатності до подальшого використання у технології FDM-друку. Отримані результати підтверджують ефективність застосування параметричного моделювання для створення функціональних виробів, забезпечення гнучкості проєктування та адаптації конструкцій до вимог сучасних адитивних технологій.

Ключові слова: 3D-моделювання, параметричне моделювання, адитивне виробництво, FDM-друк, CAD-модель, SolidWorks, STL, кронштейн.

Abstract

The article is devoted to the study of the design features of parametric 3D models for FDM printing technology using a functional bracket as an example. Modern approaches to parametric modeling in computer-aided design systems are considered, and their role in preparing products for additive manufacturing is analyzed. The main design requirements for models intended for layer-by-layer fabrication using thermoplastic material extrusion are identified. A parametric 3D

model of a bracket was developed in the SolidWorks software environment, and the main stages of digital model creation as well as its geometric characteristics were investigated. Particular attention was paid to preparing the model for additive manufacturing through export to the STL format and evaluating its suitability for subsequent use in FDM printing technology. The obtained results confirm the effectiveness of parametric modeling for the development of functional products, ensuring design flexibility and facilitating the adaptation of structures to the requirements of modern additive manufacturing technologies.

Keywords: 3D modeling, parametric modeling, additive manufacturing, FDM printing, CAD model, SolidWorks, STL, bracket.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток технологій адитивного виробництва сприяє їх широкому впровадженню у промисловість, машинобудування, поліграфію, освіту та сферу швидкого прототипування. Одним із найбільш доступних і поширених методів адитивного виготовлення є технологія FDM-друку (Fused Deposition Modeling), яка забезпечує пошарове формування виробів із термопластичних матеріалів на основі цифрових тривимірних моделей.

Ефективність використання технології FDM-друку значною мірою залежить від якості підготовки цифрової моделі виробу. На етапі проєктування необхідно враховувати не лише функціональне призначення деталі, а й особливості адитивного виготовлення, зокрема орієнтацію виробу на платформі друку, необхідність використання підтримувальних структур, геометричну складність конструкції та можливість забезпечення достатньої механічної міцності готового виробу. Недостатня увага до цих факторів може призводити до збільшення витрат матеріалу, погіршення якості поверхні та виникнення геометричних відхилень під час друку.

Особливого значення набуває використання параметричного моделювання, яке дозволяє створювати цифрові моделі зі змінними геометричними параметрами та забезпечує швидке внесення конструктивних змін без необхідності повного перепроєктування виробу. Такий підхід є ефективним під час розроблення функціональних деталей, що потребують адаптації до різних умов експлуатації та виробничих вимог.

Одним із типових функціональних виробів, які широко використовуються в інженерній практиці та можуть бути виготовлені методом FDM-друку, є кронштейни різного призначення. Для таких деталей важливими є точність відтворення геометрії, раціональна конструкція ребер жорсткості, правильне розташування монтажних отворів та забезпечення достатньої міцності конструкції.

У зв'язку з цим актуальним є дослідження особливостей проєктування параметричних 3D-моделей функціональних кронштейнів, адаптованих до вимог технології FDM-друку, а також аналіз етапів підготовки цифрової моделі до адитивного виготовлення. Це дозволяє підвищити ефективність процесу проєктування, зменшити виробничі витрати та забезпечити високу якість готових виробів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технології 3D-моделювання та адитивного виробництва активно розвиваються протягом останніх десятиліть і поступово переходять від сфери швидкого прототипування до повноцінного виготовлення функціональних виробів. Значний внесок у розвиток теоретичних основ адитивного виробництва зробили C. K. Chua та K. F. Leong [1], які систематизували основні принципи створення цифрових моделей, класифікацію технологій тривимірного друку та особливості їх практичного використання в інженерній діяльності.

Комплексний аналіз сучасних технологій адитивного виробництва наведено у праці I. Gibson, D. Rosen та B. Stucker [2]. Автори детально

розглянули особливості цифрового проєктування виробів, методи підготовки моделей до друку та перспективи використання адитивних технологій у виробничих процесах. Значну увагу приділено питанням точності виготовлення виробів та взаємозв'язку між цифровою моделлю і параметрами друку.

Однією з найбільш цитованих праць у сфері адитивного виробництва є дослідження T. D. Ngo, A. Kashani та G. Imbalzano [3], у якому узагальнено сучасний стан розвитку технологій 3D-друку, проаналізовано основні матеріали, методи виготовлення та напрями подальшого вдосконалення адитивних процесів. Автори відзначають, що якість готового виробу значною мірою залежить від коректності створення цифрової моделі та її адаптації до конкретної технології друку.

Важливе місце у процесі підготовки виробів до адитивного виготовлення займає параметричне моделювання. Особливості застосування параметричного підходу досліджували T. Sham, L. Wang та Y. Pan [5]. У своїй роботі вони показали, що використання параметричних моделей дозволяє значно спростити внесення конструктивних змін та підвищити ефективність проєктування складних виробів, що є особливо актуальним для деталей функціонального призначення.

Практичні аспекти використання програмного забезпечення SolidWorks для створення параметричних моделей розглянуто у роботі S. Tickoo [4]. Автор детально описує методи побудови ескізів, створення об'ємної геометрії та формування параметричних залежностей між окремими елементами конструкції.

Питання інтеграції цифрового моделювання та адитивного виробництва висвітлено у праці B. Redwood, F. Schöffer та B. Garret [6]. Дослідники зазначають, що ефективність процесу FDM-друку значною мірою

визначається якістю STL-моделі, правильністю її орієнтації на платформі та коректністю параметрів slicing.

Подальший розвиток технологій адитивного виробництва відображено у роботі A. Gebhardt та J. S. Hötter [7], де проаналізовано сучасні підходи до проєктування виробів для 3D-друку та наведено рекомендації щодо оптимізації конструкцій з урахуванням особливостей пошарового виготовлення.

Технологічні аспекти процесу FDM-друку розглянуті у дослідженні B. N. Turner, R. Strong та S. A. Gold [8]. Автори встановили, що геометричні характеристики виробів залежать не лише від параметрів друку, а й від конструктивних особливостей цифрової моделі, створеної на етапі проєктування.

Значний інтерес становлять дослідження властивостей PLA-пластику як одного з найбільш поширених матеріалів для FDM-друку. У роботі S. Farah, D. G. Anderson та R. Langer [9] проаналізовано фізико-механічні характеристики матеріалу та особливості його використання для виготовлення функціональних виробів.

Серед українських досліджень слід відзначити роботу М. Т. Лабецької [10], у якій розглянуто сучасні напрями застосування 3D-технологій та перспективи їх використання у виробничій і освітній діяльності. Автор наголошує на зростанні ролі цифрового моделювання як невід’ємної складової сучасних адитивних технологій.

Проведений аналіз літературних джерел показав, що питання параметричного проєктування виробів для технології FDM-друку залишаються актуальним напрямом досліджень. Незважаючи на значну кількість робіт, присвячених адитивному виробництву, особливості розроблення параметричних моделей функціональних деталей із

урахуванням вимог подальшого FDM-друку потребують подальшого вивчення, що і зумовило напрям даного дослідження.

Мета статті. Мета статті полягає у дослідженні особливостей проєктування параметричних 3D-моделей функціональних виробів для технології FDM-друку на прикладі кронштейна, а також аналізі основних етапів створення цифрової моделі, її підготовки до адитивного виготовлення та оцінюванні придатності конструкції до пошарового формування методом екструзії термопластичних матеріалів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

1. Теоретичні засади проєктування виробів для технології FDM-друку.

1.1. Особливості параметричного 3D-моделювання функціональних деталей. Параметричне 3D-моделювання є одним із найбільш поширених підходів до створення цифрових моделей виробів для адитивного виробництва. Його особливістю є використання параметрів і залежностей між окремими елементами конструкції, що дозволяє швидко змінювати геометрію виробу без повного перепроєктування моделі [4, 5].

Застосування параметричного підходу забезпечує підвищення ефективності проєктування функціональних деталей, зокрема кронштейнів, корпусних елементів та монтажних вузлів. На етапі створення цифрової моделі визначаються основні геометричні характеристики виробу, розташування отворів, товщина стінок та конструктивні елементи жорсткості, які впливають на експлуатаційні властивості готової деталі [1, 2].

Під час проєктування виробів для технології FDM-друку необхідно враховувати особливості пошарового формування конструкції. Раціональне використання параметричного моделювання дозволяє забезпечити технологічність виробу, зменшити кількість підтримувальних структур та підвищити ефективність подальшого адитивного виготовлення [6, 7].



Рис. 1. Послідовність формування параметричної моделі виробу для технології FDM-друку

Джерело: сформовано авторами на основі [4–6].

1.2. Конструктивні вимоги до виробів, призначених для FDM-друку. Якість виробів, виготовлених методом FDM-друку, значною мірою залежить від правильності проєктування їх конструкції. На відміну від традиційних методів виготовлення, технологія пошарового формування передбачає врахування специфічних вимог до геометрії моделі ще на етапі цифрового проєктування [2, 6].

Одними з основних конструктивних параметрів є товщина стінок, наявність нависаючих елементів, розташування отворів та використання ребер жорсткості. Недостатня товщина конструктивних елементів може призводити до зниження міцності виробу, тоді як надмірна кількість нависань збільшує потребу у підтримувальних структурах та ускладнює післяобробку деталі [7, 8].

Під час проєктування функціональних кронштейнів особливу увагу приділяють забезпеченню жорсткості конструкції та рівномірному розподілу навантажень. Для цього використовують ребра жорсткості, заокруглення внутрішніх кутів і раціональне розміщення монтажних отворів. Такий підхід сприяє підвищенню надійності виробу та покращує умови його виготовлення методом FDM-друку [1, 9].

2. Розроблення параметричної 3D-моделі кронштейна

2.1. Обґрунтування вибору конструкції виробу. Для проведення дослідження було обрано функціональний кронштейн як один із найбільш поширених типів деталей, що використовуються для монтажу та кріплення різноманітних конструктивних елементів. Такі вироби широко застосовуються в машинобудуванні, електротехніці, побутових пристроях та інших галузях, де важливими є точність геометричних параметрів і достатня жорсткість конструкції [2].

Вибір кронштейна як об’єкта дослідження обумовлений також можливістю ефективного використання параметричного моделювання під час його проєктування. Конструкція виробу містить типові елементи, характерні для багатьох функціональних деталей: монтажні отвори, опорні поверхні та ребра жорсткості. Це дозволяє оцінити можливості застосування сучасних CAD-систем для створення моделей, придатних до подальшого виготовлення методом FDM-друку [4, 5].

При розробленні конструкції особлива увага приділялася забезпеченню технологічності виробу. Геометрія кронштейна формувалася таким чином, щоб мінімізувати кількість нависаючих елементів і зменшити потребу у використанні підтримувальних структур під час друку. Такий підхід сприяє скороченню витрат матеріалу та спрощує процес післяобробки готового виробу [6].

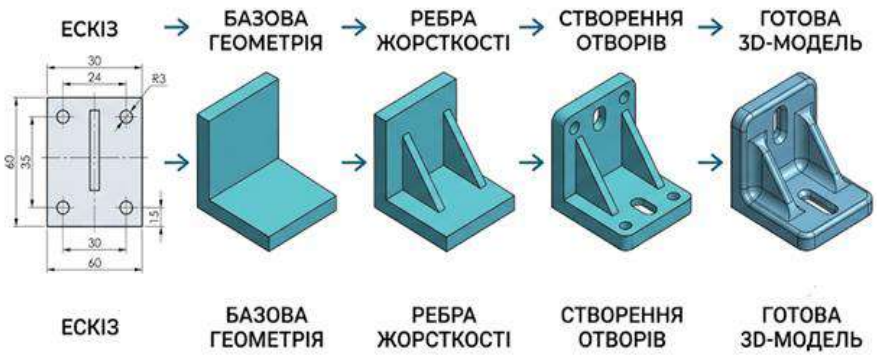


Рис. 2. Основні етапи побудови параметричної 3D-моделі кронштейна.

Джерело: розроблено авторами.

2.2. Створення цифрової моделі кронштейна у середовищі SolidWorks. Для створення цифрової моделі виробу використовувалося програмне середовище SolidWorks, яке належить до найбільш поширених CAD-систем для параметричного проєктування. Застосування даного програмного забезпечення дозволяє створювати тривимірні моделі різного рівня складності та забезпечує можливість подальшої підготовки виробів до адитивного виготовлення [4].

Побудова моделі кронштейна здійснювалася поетапно. На початковому етапі було сформовано базовий двовимірний ескіз із використанням геометричних примітивів та параметричних розмірів. Після цього виконувалося створення основної об'ємної геометрії методом витягування ескізу. Наступними етапами були формування монтажних отворів та додавання ребер жорсткості для підвищення міцності конструкції.

Завершальним етапом проєктування стала перевірка геометричної коректності моделі та її відповідності вимогам технології FDM-друку. Особлива увага приділялася відсутності дефектів геометрії, правильності розташування конструктивних елементів та забезпеченню можливості подальшого експорту моделі у формат STL.

Створена цифрова модель дозволяє оперативно змінювати геометричні параметри виробу шляхом коригування окремих розмірів та конструктивних залежностей. Це забезпечує гнучкість проєктування та можливість адаптації моделі до різних умов використання без необхідності повторної побудови всієї конструкції.

2.3. Аналіз геометричних параметрів розробленої моделі. Після завершення побудови цифрової моделі було проведено аналіз її основних геометричних параметрів. Оцінювання здійснювалося з метою перевірки відповідності конструкції вимогам технології FDM-друку та забезпечення

можливості подальшого виготовлення виробу без суттєвих конструктивних змін.

Під час проєктування кронштейна враховувалися вимоги щодо забезпечення достатньої жорсткості конструкції, раціонального розташування монтажних отворів та зменшення кількості елементів, які можуть потребувати використання підтримувальних структур під час друку. Особлива увага приділялася формуванню ребер жорсткості, що дозволяють підвищити механічну стійкість виробу без значного збільшення витрат матеріалу.

Основні геометричні характеристики розробленої моделі наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Основні геометричні параметри параметричного кронштейна

Параметр	Значення
Загальна довжина виробу	80 мм
Загальна висота виробу	60 мм
Ширина основи	40 мм
Товщина стінок	4 мм
Діаметр монтажних отворів	8 мм
Кількість монтажних отворів	2
Товщина ребер жорсткості	3 мм

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз створеної моделі показав, що конструкція характеризується достатньою простотою геометричної форми та придатна для виготовлення методом FDM-друку. Наявність параметричних залежностей між окремими елементами забезпечує можливість швидкого коригування розмірів виробу залежно від вимог користувача або умов експлуатації.

Отримані результати підтверджують доцільність використання параметричного підходу під час проєктування функціональних деталей для адитивного виробництва. Створена модель може бути використана для подальшої підготовки до FDM-друку шляхом експорту у формат STL та налаштування параметрів виготовлення у програмному середовищі Cura.

3. Експорт параметричної моделі у формат STL. Після завершення проєктування параметричної моделі кронштейна було виконано її підготовку до адитивного виготовлення. Першим етапом цього процесу став експорт цифрової моделі з програмного середовища SolidWorks у формат STL (Stereolithography), який є одним із найбільш поширених форматів обміну даними в технологіях 3D-друку [1, 6].

Формат STL використовується для представлення геометрії виробу у вигляді полігональної сітки, що складається з трикутних елементів. Якість сформованої STL-моделі безпосередньо впливає на точність відтворення геометрії під час подальшого друку, тому на етапі експорту важливо забезпечити достатній рівень деталізації поверхонь та коректність побудови полігональної структури [2].

Перед експортом було проведено перевірку моделі на наявність геометричних помилок, незамкнених контурів та дефектів поверхонь. Така перевірка дозволяє уникнути проблем під час подальшої обробки моделі у програмі-слайсері та забезпечує стабільність формування G-коду для 3D-принтера [4].

У результаті експорту було отримано STL-файл, придатний для подальшого використання у технології FDM-друку. Збереження геометричних характеристик та відсутність помилок полігональної сітки підтвердили коректність виконаного параметричного проєктування і готовність моделі до наступних етапів адитивного виготовлення.

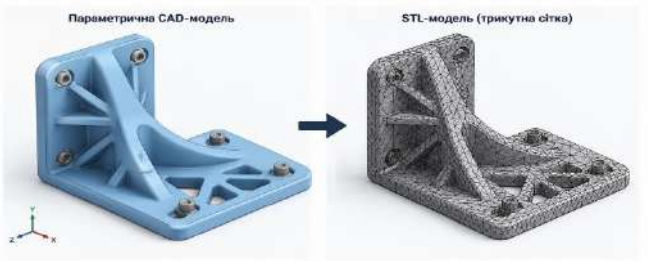


Рис. 3. Перетворення параметричної CAD-моделі кронштейна у формат STL

Джерело: розроблено авторами.

Висновки. Проведене дослідження дозволило проаналізувати особливості використання параметричного 3D-моделювання під час проєктування виробів для технології FDM-друку. Встановлено, що застосування параметричного підходу спрощує внесення конструктивних змін, підвищує гнучкість проєктування та забезпечує ефективну адаптацію цифрових моделей до вимог адитивного виробництва.

Розроблено параметричну 3D-модель функціонального кронштейна у програмному середовищі SolidWorks. Під час проєктування враховано основні вимоги до виробів, призначених для виготовлення методом FDM-друку, зокрема забезпечення достатньої жорсткості конструкції, раціонального розташування монтажних отворів та мінімізації елементів, що потребують використання підтримувальних структур.

Досліджено основні етапи створення цифрової моделі та виконано її підготовку до адитивного виготовлення шляхом експорту у формат STL. Проведений аналіз підтвердив придатність розробленої конструкції до подальшого використання в технології FDM-друку.

Результати дослідження підтвердили ефективність параметричного моделювання як інструменту цифрового проєктування виробів, призначених для виготовлення засобами сучасних адитивних технологій.

Список використаних джерел

1. Chua, C. K., & Leong, K. F. (2017). 3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications (5th ed.). Singapore: World Scientific Publishing.

2. Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2021). Additive Manufacturing Technologies (3rd ed.). New York: Springer.

3. Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B: Engineering, 143, 172–196.

4. Tickoo, S. (2022). SolidWorks for Designers. Purdue University Northwest.

5. Sham, T., Wang, L., & Pan, Y. (2020). Parametric modelling in additive manufacturing systems. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 108, 1257–1271.

6. Redwood, B., Schöffer, F., & Garret, B. (2020). The 3D Printing Handbook: Technologies, Design and Applications. Amsterdam: 3D Hubs B.V.

7. Gebhardt, A., & Hötter, J. S. (2019). Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. Munich: Hanser Publishers.

8. Turner, B. N., Strong, R., & Gold, S. A. (2014). A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. Rapid Prototyping Journal, 20(3), 192–204.

9. Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications. Advanced Drug Delivery Reviews, 107, 367–392.

10. Лабецька, М. Т., Гавенко, М. М. (2017). Застосування 3D-технологій в інклюзивному середовищі. Технологія і техніка друкарства, 1, 47–54. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Titd_2017_1_9

References

1. Chua, C. K., & Leong, K. F. (2017). 3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications (5th ed.). Singapore: World Scientific Publishing.

2. Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2021). Additive Manufacturing Technologies (3rd ed.). New York: Springer.

3. Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B: Engineering, 143, 172–196.

4. Tickoo, S. (2022). SolidWorks for Designers. Purdue University Northwest.

5. Sham, T., Wang, L., & Pan, Y. (2020). Parametric modelling in additive manufacturing systems. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 108, 1257–1271.

6. Redwood, B., Schöffer, F., & Garret, B. (2020). The 3D Printing Handbook: Technologies, Design and Applications. Amsterdam: 3D Hubs B.V.

7. Gebhardt, A., & Hötter, J. S. (2019). Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. Munich: Hanser Publishers.

8. Turner, B. N., Strong, R., & Gold, S. A. (2014). A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. Rapid Prototyping Journal, 20(3), 192–204.

9. Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications. Advanced Drug Delivery Reviews, 107, 367–392.

10. Labetska, M. T., & Havenko, M. M. (2017). Zastosuvannia 3D-tekhnolohii v inkliuzyvnomu seredovyshchi. Tekhnolohiia i Tekhnika Drukarstva, 1, 47–54. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Titd_2017_1_9