

С.В. Мисковець, Д.А. Гусачук, В.П. Кашицький, І.О. Парфентьєва

Луцький національний технічний університет

КОРЕКЦІЇ CAD МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ 3D ДРУКУ

В роботі розглянуті питання покращення якості та функціональності виробів, отриманих з використанням технологій FDM друку. На основі досліджень впливу геометричних параметрів цифрових моделей на якість формоутворення деталей запропоновано метод корекції їх конфігурації на стадії їх підготовки.

Ключові слова: адитивне виробництво, 3D друк, CAD модель, 3D сканер, FDM технології, прототип, STL модель, слайсинг

S. Myskovets, D. Husachuk, V. Kashytskyi, I. Parfentyeva

CAD MODEL CORRECTIONS TO OPTIMIZE 3D PRINTING PROCESSES

The paper considers issues of improving the quality and functionality of products obtained using FDM printing technologies. Based on studies of the influence of geometric parameters of digital models on the quality of forming parts, a method of correcting their configuration at the stage of their preparation is proposed.

Key words: additive manufacturing, 3D printing, CAD model, 3D scanner, FDM technologies, prototype, STL model, slicing

Постановка проблеми. Адитивні технології та процеси 3D друку на сьогодні є найбільш актуальними для потреб швидкого прототипування та виготовлення готових виробів у різних галузях промислового виробництва [1]. Потенційні переваги адитивного виробництва включають зменшення матеріальних витрат, прискорення процесу виробництва, можливість децентралізації виробничого процесу та, як наслідок, зниження витрат на логістичні потреби: транспортування, зберігання, реалізацію об'єктів, яких було б важко або неможливо досягти звичайними субтрактивними засобами виробництва.

Ручна робота зі створення та виготовлення прототипів крім збільшення часу на виготовлення продукту, часто обмежує кількість можливих конструктивних змін. Це не дозволяє досягнути достатньої оптимізації продукту, його конструктивної досконалості і, особливо, функціональності. Тут, слід зазначити, що ця стратегія відтворення конструктивних елементів для деталей простої геометрії, активно використовується і зараз, коли за допомогою примітивів у спеціалізованому програмному середовищі будується параметрична 3D модель.

Сучасне адитивне виробництво в його поєднанні з іншими технологіями для формування технологічних ланцюжків може бути використано для значного скорочення термінів розробки та вартості продукції. Останнім часом, деякі з цих технологій були розроблені до такого ступеня досконалості, що результат їх застосування підходить для кінцевого використання. Це пояснює, еволюцію термінології: від «швидкого прототипування» до «адитивного виробництва». Більш того, сучасні 3D технології, що засновані на використанні потужних енергетичних систем, дозволяють зараз виготовляти деталі з різноманітних металів та сплавів, розширюючи їх сферу застосування ще більше.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні технології 3D друку конкурують в багатьох практичних галузях з традиційними методами обробки [1-2]. Успіхи у сучасному матеріалознавстві та виробництві апаратних засобів адитивних виробництв, дозволили ефективно застосовувати технологію 3D друку не лише моделей (прототипів), а і реальних деталей, готових виробів для потреб різних галузей техніки [3].

Процес моделювання наплавлення (FDM) став провідним процесом адитивного виробництва за останні кілька років. Він дає можливість виготовляти фізичні деталі будь-якої геометрії з широким діапазоном інженерних термопластичних матеріалів без необхідності використання спеціальних інструментів. І хоча теперішній стан технології фактично здатний замінити звичайні виробничі процеси, кінцеві властивості виготовлених продуктів, все ж ще недостатньо сильні для різноманітних промислових застосувань. Процес FDM має власні недоліки, пов'язані з точністю деталей, часом обробки та механічними властивостями [4, 5]. Отже, існують певні проблеми щодо якості та функціональності виготовлених деталей. Відомо, що деталь, виготовлена за допомогою процесу FDM, є анізотропною через її залежність від великої кількості суперечливих параметрів процесу [6-8]. Важливо розуміти ключові проблеми та слабкі сторони процесу та вжити заходів для

оптимізації параметрів, що впливають на якість, чіткість геометрії та продуктивність за різних умов виконання.

Постановка завдання та мета дослідження. Метою дослідження було визначення впливу геометрії на якість друку початкових адитивних шарів під час друку пластикними філаментами (FDM), в умовах нерівномірності робочої платформи, та розробка способу корекції CAD моделей для усунення можливих дефектів друку.

Виклад основного матеріалу. Як відомо адитивне виробництво включає в себе кілька етапів, починаючи з віртуального CAD опису деталі та її функціоналу, отримання цифрових даних процесу, та закінчуючи фізичним результатом її створення. Різноманітні вироби включають в себе процеси адитивного виробництва різними шляхами та в різній мірі. Відносно прості вироби можуть використовувати адитивне виробництво для демонстраційних моделей, в той час як, більш складніші, з великим інженерним наповненням, можуть використовувати адитивне виробництво на багатьох етапах процесу розробки.

Якість FDM виробів та стабільність самого процесу друку методом наплавлення полімерних матеріалів залежать від нанесення початкових шарів матеріалу. Ця обставина особливо актуальна для порівняно недорогого, але найбільш розповсюдженого обладнання, зокрема 3D принтерів без спеціальних апаратних засобів калібрування робочої платформи, стола машини, систем подачі матеріалу. З огляду на це стає важливим ступінь адгезії пластику до столу принтера, адже за умов нерівномірності зазору між соплом екструдера, у випадку перевищення його значення товщини витисненого філаменту, унеможливується контакт з платформою. Слід зазначити, що для деяких матеріалів, в особливості для ABS пластиків, величину зазору свідомо зменшують до критичних значень. Це викликає примусове "втирання" розплавленого пластику в поверхню платформи, для підвищення ступеня адгезії полімеру до матеріалу робочої платформи принтера.

З метою підвищення ступеня адгезії філаменту до столу FDM принтера часто застосовують спеціальні адгезиви. Їх використання підвищує вартість друку та ускладнює процес, постобробку, вимагає зайвих процедур обслуговування тощо. Тому в роботі пішли шляхом свідомого зменшення товщини першого шару друку, із збереженням типових значень всіх інших параметрів. У цьому випадку перші шари виробу є значно стиснуті по висоті та ступінь їх розтікання в бічні сторони є досить значним. Нажаль, це спотворює геометрію моделей та якість виробів певної категорії, для яких важлива чіткість друку початкових шарів (рис. 1). Таке явище особливо помітне за нерівномірності робочої поверхні столу, що часто зустрічається у більшості доступних за ціною машин для FDM друку.

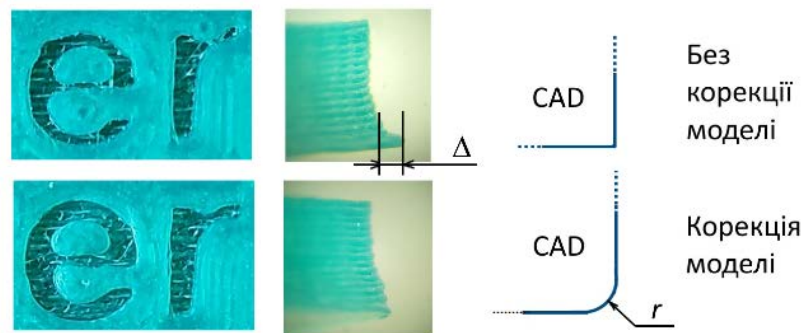


Рис. 1. Результати корекції CAD моделі

Для корекції такого дефекту друку (Δ), зменшення його прояву на виробах, у роботі запропоновано спосіб адаптації початкових CAD моделей. У геометрію опорних поверхонь моделі додавали скруглення чи фаски. Відповідно гострі елементи мали зрізи, призначення яких умовно враховує ступінь розширення першого шару. Слайсинг такої моделі зменшує опорну площу підготовленого до друку виробу, що компенсується під час фізичного нанесення пластику, коли зазор між соплом та столом принтера критично зменшується. В роботі досліджували залежність між товщиною шару друку, що заданий у слайсері, та радіусом скруглень (табл. 1). Встановлено, що оптимальними значеннями радіусу скруглення є 2...5 шарів друку. Зокрема, для сопла екструдера 0,4 мм, його величину приймали $r=0,5...0,6$ мм.

З отриманих у дослідженнях даних видно, що ступінь прояву дефекту більший для більших значень товщини шару матеріалу, який наноситься на робочу платформу.

Значення дефекту друку (Δ) в залежності від параметрів FDM друку

Діаметр сопла екструдера, мм	Товщина перших шарів друку, мм	Прийнятий радіус скруглення (r), мм (корекція CAD моделі)	Величина дефекту друку (Δ), мм		Кількість шарів друку в межах дефекту
			без корекції	з корекцією	
0,2	0,12	0,3	0,5	0,20	5
0,3	0,17	0,4	0,8	0,25	4
0,4	0,20	0,6	1,1	0,30	3
0,5	0,25	0,8	1,4	0,30	3

Таку причину можна пояснити масштабним ефектом: більш масивні шари пластику здатні інтенсивно розтікатись за відсутності просторових обмежень. За зменшення товщини шару матеріал пластику швидше твердне, за однакових умов обдуву кулера робочої головки принтера. Отже, для більшого діаметра сопла застосування запропонованої методики корекції дефекту FDM друку є більш актуальним та важливим для усунення спотворень виробів.

Розглядаючи запропонований спосіб корекції подібного роду дефектів в процесі 3D друку, слід зауважити, що він є досить простим у випадку наявності параметричної CAD моделі. За випадку ж отримання просторових твердотільних полігональних цифрових моделей така корекція може бути ускладненою, особливо для просторово складних фігур. Мова іде про об'єкти, отримані 3D скануванням, з використанням спеціалізованих сканерів. Функціональність моделі з огляду на глобальну корекцію геометрії та конструктивної еволюції виробу, за потреби, є обмеженою, адже модель являє собою полігональне тіло, а не CAD модель з параметричним набором даних. Крім того, отримані полігональні моделі можуть містити надмірно велику множину mesh-даних. Це досить сильно збільшує розмір файлу STL моделі та значно ускладнює подальшу роботу, аж до блокування програмного забезпечення для слайсингу, не говорячи вже про цифрову обробку моделі та її параметризацію, за потреби. Як відомо, більшість програм слайсерів для FDM друку задовільно справляються з файлами твердотільних моделей, розмір яких не перевищує 25 Мб. Виправити положення можна безпосередньо у програмах сканування, вибравши функцію спрощення у процесі постобробки моделі. Так можна усунути артефакти на плоских поверхнях моделі, що виникають як наслідок фіксації текстур.

З метою уникнення кропіткого процесу повноцінного реінжинірингу, у роботі використовували редактори твердотільних цифрових STL моделей. Зокрема, використовували програму MeshLab для обробки неструктурованих сіток, що розроблена дослідницьким центром ISTI-CNR [9]. Використовуючи її програмне середовище можна застосовувати програмні методи аналізу та корекції твердотільних моделей (рис. 2).

Отримані у роботі твердотільні моделі обробляли із застосуванням методів так званої mesh-корекції: віднімання, додавання фасет, спрощення поверхні, заповнення розривів, фільтри очищення поверхонь тощо. Для граней з гострими кряями у програмі можна застосувати фільтр, що працює на процесорі з системою лапласівської обробки. Використовуючи вбудований фреймворк, на основі оператора Лапласа, можна визначати диференціальні координати та нові триангуляційні елементи для ефективного представлення геометрії сітки.

Застосовуючи алгоритми згладжування програми MeshLab слід виділяти групу крайових фасет, що утворюють гострий кут, для випадку локального застосування фільтру. Цей процес також може бути досить кропітким для моделей з великою ступенем деталізації, тому доцільним є виділення граней з застосуванням вузлових точок, які є вершинами фасет сітки, що утворюють грань.

Застосування програми MeshLab для твердотільних моделей, отриманих 3D скануванням, дозволяє уникнути складного процесу реконструкції STL сіток, який часто виконується у спеціалізованому дороговартісному програмному забезпеченні. Для розглядуваного в роботі завдання корекція сіток може бути недостатньо точною, оскільки цифрові скани як правило містять шуми, що здатні формувати хибні фасеткові вузли. Цю особливість слід враховувати для конкретних потреб реінжинірингу.

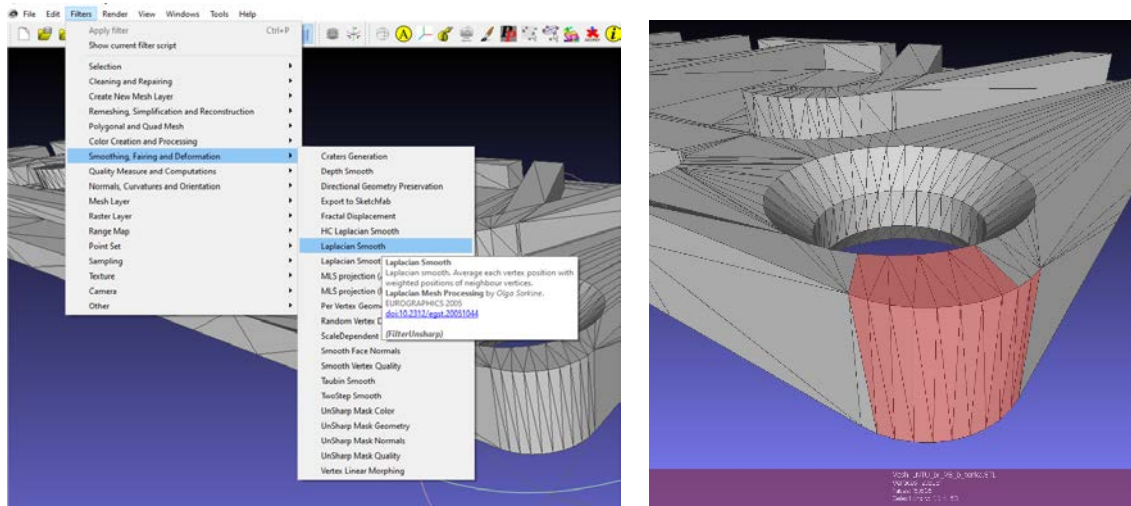


Рис. 2. Корекція STL моделі у програмі MeshLab

Висновок. На основі досліджень впливу геометричних параметрів цифрових моделей на якість формоутворення деталей запропоновано метод корекції їх конфігурації на стадії їх підготовки. Встановлено, що застосування технологічних параметрів під час слайсингу, які сприяють підвищенню адгезії матеріалу FDM друку до робочої поверхні столу принтера, можливі значні спотворення геометрії виробів. Цей негативний ефект може посилюватись за збільшення діаметру сопла екструдера. Величину такого спотворення можна регулювати не лише параметрами друку, а і геометричною корекцією CAD моделей. У випадку застосування ABS пластику встановлено, що для діаметру сопла 0,4 мм доцільно призначати радіус скруглення на краях опорної поверхні моделі до 0,5...0,6 мм. Для твердотільних моделей з триангуляційним представленням геометрії є доцільним використання спеціальних програм редакторів mesh-об'єктів, зокрема програми MeshLab. Застосування такого програмного забезпечення дозволяє уникнути трудомісткого процесу CAD-реконструкції сканованих цифрових копій зі складною геометрією, що є важливим у експрес-процесах реінжинірингу.

Список використаних джерел

1. Additive Manufacturing Technologies / Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker, Mahyar Khorasani // Springer, Cham, 2021. – p. 675, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>.
2. Адитивні технології та матеріали: навч. посібник / Д.А. Гусачук, М.Д. Мельничук, В.М. Малець. – Луцьк : ЛНТУ, 2022. – 272 с. ISBN 978-617-8018-36-8.
3. Прототипування та стратегія реверс інжинірингу на прикладі інженерних задач адитивного виробництва / Д.А. Гусачук, М.Д. Мельничук, І.О. Парфентьєва, Т.В. Фурс, І.В. Боярська // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». - 2023 - № 76. - С.75-83. / URL: <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2023.76.82>.
4. F. Yasmin, M. Khan and Q. Peng. "Optimization of Processing Parameters for 3D Printed Product Using Taguchi Method". Computer-Aided Design & Applications, 21(2), 2024, 281-300. <https://doi.org/10.14733/cadaps.2024.281-300>.
5. Zhang, Pengfei, Wang, Zongxing, Li, Junru, Li, Xinlin and Cheng, Lianjun. "From materials to devices using fused deposition modeling: A state-of-art review" Nanotechnology Reviews, vol. 9, no. 1, 2020, pp. 1594-1609. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0101>.
6. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування [Текст] : навч. посіб. / О. Д. Манжілевський, Р. Д. Іскович-Лотоцький ; Вінниц. нац. техн. ун-т. - Вінниця : ВНТУ, 2021. - 104 с.
7. Additive Manufacturing: A Tool for Industrial Revolution 4.0 / Manjaiah, M. Raghavendra, K. Balashanmugam, N. Davim, P.J., Woodhead Publishing Reviews: Mechanical Engineering Series. 2021, p. 324. ISBN: 978-0-12-822057-3.
8. Kumar, M., Ramakrishnan, R. & Omarbekova, A. 3D printed polycarbonate reinforced acrylonitrile–butadiene–styrene composites: Composition effects on mechanical properties, micro-structure and void formation study. J Mech Sci Technol 33, 5219–5226 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12206-019-1011-9>.
9. MeshLab. Url - <https://www.meshlab.net>.