

УДК 004.9

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-22-14

Марчук В.І., Тулашвілі Ю.Й., Лук'янчук Ю.А.

Луцький національний технічний університет

НАВЧАННЯ ФАХІВЦІВ 3D-ДРУКУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯ FDM ТЕХНОЛОГІЇ

В статті описано, що Україна стикалася з рядом проблем у розвитку 3D-технологій, які були виявлені під час аналізу попередніх досліджень. Однак, існують можливості для покращення ситуації в цій галузі у майбутньому. Для досягнення цієї мети було проведено дослідження освітнього процесу для фахівців, які працюють у сфері 3D-технологій. Це аналізувалося з метою визначити можливі недоліки і пропозиції щодо поліпшення навчального процесу. В результаті було розроблено спеціальний освітній контент, який охоплює ключові аспекти 3D-друку. Цей контент призначений для підготовки фахівців із 3D-друку та надає необхідні знання і навички для ефективної роботи з цією технологією. Крім того, був складений перелік рекомендацій, спрямованих на опис досвіду використання 3D-технологій і усунення дефектів, що виникають при виготовленні продукції з використанням аддитивних технологій. Ці рекомендації допоможуть удосконалити процес виробництва та забезпечити високу якість готової продукції. В цілому, ці заходи мають на меті покращити стан 3D-технологій в Україні. Впровадження освітнього контенту та рекомендацій допоможе збільшити кількість кваліфікованих фахівців у цій галузі, підвищити якість виробництва та сприятиме подальшому розвитку 3D-технологій у майбутньому.

Ключові слова: програмні засоби, освіта, формальна, неформальна та інформальна освіта, дефекти 3D-друку, 3D-технології.

Постановка проблеми. Адитивне виробництво або 3D-друк - це процес створення тривимірних об'єктів практично будь-якої геометричної форми на основі цифрових 3D-моделей. Концепція 3D-друку базується на створенні об'єктів послідовними шарами, які відтворюють контури 3D-моделі.

Адитивне виробництво використовується для виготовлення прототипів, зразків і готових виробів з різних матеріалів, від пластмас до композитних компонентів.

Технологія адитивного виробництва широко використовується для створення прототипів у різних галузях, включаючи мистецтво і будівництво, медичну біоінженерію, моду, ювелірні вироби та створення зразків у промисловому виробництві. Адитивне виробництво є автоматизованим і тому неможливе без джерела інформації про взаємозв'язок між елементами друкованого об'єкта та його формою. Таким джерелом інформації є цифрова тривимірна модель (3D-модель). 3D-моделі створюються шляхом ручного комп'ютерного графічного дизайну або 3D-сканування. Створення 3D-моделей для 3D-друку, як ручним, так і автоматизованим способом, ускладнене технічними обмеженнями адитивного виробництва. Технічні обмеження стереолітографії ускладнюють процес створення 3D-моделей.

Під час друку 3D-принтер зчитує файл 3D-моделі, що містить дані про форму об'єкта, який потрібно надрукувати, визначає послідовні шари рідини або порошку, які потрібно нанести, і будує 3D-модель з поперечного перерізу. Ці шари відповідають віртуальним перерізам у 3D-моделі і об'єднуються або сплаваються, щоб сформувати об'єкт певної форми.

Найпоширенішою системою координат, що використовується в технології моделювання, є декартова система координат, яка базується на прямокутному тривимірному просторі з осями X, Y і Z. Тому якість виробу, отриманого в результаті 3D-друку, багато в чому залежить від роздільної здатності і точності позиціонування 3D-принтера.

Роздільна здатність - це товщина шарів, що наносяться вздовж осі Z. Типова товщина шару становить 100 мікрон, тоді такі пристрої, як Objet Connex і 3D Systems ProJet, можуть друкувати шари товщиною до 16 мікрон. Точність позиціонування друкуючої головки визначається в горизонтальній площині по осях X і Y. Роздільна здатність і точність позиціонування вимірюються в DPI (точках на дюйм) або мікрометрах; роздільна здатність по осях X і Y подібна до звичайних 2D лазерних принтерів. Типова роздільна здатність DPI становить приблизно 50-100 мікрон. Найпопулярнішою технологією адитивного моделювання є FDM (екструзійний 3D-друк) - пошарове моделювання термопластичних полімерів (наприклад, поліактиду, акрилонітрилу бутадієн-стиролу).

Процес пошарового друку створює шари шляхом екструзії матеріалу, що швидко твердне, у вигляді мікрокрапель або тонких струменів. Екструдер нагріває матеріал до температури плавлення і пропускає розплавлену масу через сопло.

Від якості технології адитивного лиття за моделлю FDM значною мірою залежить якість майбутнього виробу з 3D-моделі: Якщо дизайнер 3D-моделі припуститься помилок, пов'язаних з недотриманням технічних специфікацій FDM, під час 3D-друку з'являться дефекти, пов'язані з властивостями цієї технології адитивного лиття. Тому для отримання якісної 3D-моделі дизайнер повинен мати чітке уявлення про всі особливості технології адитивного виробництва FDM.

Розвиток технології 3D-друку широко висвітлюється в літературі, що розповідає про закордонний досвід. Інженери знаходять практичне застосування 3D-прототипування: 3D-друк дозволяє перетворювати нові проекти на вироби, які є надто рідкісними, щоб їх можна було реалізувати за допомогою традиційних методів виробництва. Науково-технічні публікації [1, 2, 3] відображають ноу-хау для спеціалізації в технології 3D-друку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Світовий досвід підготовки фахівців з 3D-технологій різноманітний, але в основному включає низку платформ та знань, де професіонали діляться своїм досвідом. Наприклад, Сабрі Соломан показує, як змінилася галузь під впливом широкого впровадження технології 3D-друку [4]; робота Хардіка Пандї пояснює основи технології ламінованого формування, розкриває досвід, отриманий під час практичних занять, і зібрана в навчальні матеріали для 3D-друку та розвитку фахівців з 3D-друку [5].

Наразі досвід підготовки фахівців з 3D-друку в Україні невеликий. Відповідні фахівці здебільшого навчаються самотужки, створюючи та розширюючи власний досвід; при вивченні технологій 3D-друку часто використовуються переклади міжнародного досвіду [6, 7, 8, 9].

Вітчизняна література з 3D-друку відсутня. Тому важливо проаналізувати технологію ламінованого друку в Україні та визначити обсяг знань, необхідних для оволодіння цією технологією.

Метою даної роботи є створення алгоритму оцінки якості 3D-моделей в процесі формування на основі класифікації типових дефектів, що призводять до браку виробів, виготовлених за технологією адитивного лиття під тиском (FDM).

Викладення основного матеріалу. Технологія пошарового нашарування має певні обмеження з точки зору складності створюваних геометричних форм.

У технології пошарового нашарування FDM екструдер 3D-принтера рухається в горизонтальній і вертикальній площинах під контролем алгоритмів, подібних до тих, що використовуються в верстатах з числовим програмним управлінням. Сопло рухається по траєкторії, визначеній CAD-системою відповідно до контурів 3D-моделі. Шар за шаром, знизу вгору, створюється FDM-модель, форма якої точно відповідає 3D-моделі.

Пошарове осадження FDM, найбільш поширений і комерційно доступний метод 3D-друку, має широкий спектр витратних матеріалів (ниток). В якості ниток для екструзійного друку використовуються найрізноманітніші полімери, в тому числі акрилонітрил-бутадієн-стирол (ABS), полікарбонат, полімолочна кислота (PLA), поліетилен високого тиску (PETG), суміші полікарбонату і ABS-пластика, поліфеніленсульфон. Полімери виготовляються з чистого пластику. Полімери постачаються у вигляді наповнювача, виготовленого з чистого пластику.

Деякі типові помилки, які можуть виникнути при моделюванні формованих об'єктів для 3D-друку:

1. Неоднорідна геометрія [10] - поширена помилка, яка може виникнути при моделюванні об'єктів для 3D-друку. Неоднорідна геометрія виникає, коли поверхні 3D-моделі неправильно з'єднуються або перетинаються, що призводить до помилок при створенні траєкторії, по якій рухається друкуюча головка принтера, програмним забезпеченням слайсера.

2. Помилка товщини стінок - ще одна поширена проблема, яка може виникнути при моделюванні об'єктів для 3D-друку. Ця помилка виникає, коли стінки моделі занадто тонкі або занадто товсті для принтера і використовуваного матеріалу. Це призводить до надмірного або недостатнього видавлювання матеріалу, що призводить до низької якості виробу. Якщо стінки занадто тонкі, принтеру може бути складно витиснути достатньо матеріалу для створення суцільної, безперервної стінки, що призведе до появи порожніх проміжків. З іншого боку, якщо стінки занадто товсті, принтер може видавити занадто багато матеріалу, що призведе до шорсткої поверхні або деформації моделі через накопичення матеріалу.

3. Виступи і невідтримувана геометрія [11] - це елементи 3D-моделі, які виступають за межі тіла моделі і не мають опорної конструкції. Ці елементи можуть ускладнити друк, оскільки принтер не може достатньо швидко охолодити матеріал виробу.

4. Помилки, яких припускаються при розробці 3D-моделей для друку. Ця помилка виникає, коли модель неправильно масштабується або коли модель неправильно модифікується в процесі проектування.

Неправильне масштабування може призвести до того, що модель буде занадто маленькою або занадто великою, що може мати значний вплив на кінцевий продукт. Наприклад, занадто маленьку модель важко побачити і використовувати через недостатню деталізацію. З іншого боку, занадто великі моделі погано встановити і вони є занадто важкими.

5. Геометрія, що не підлягає друку - стосується елементів 3D-моделі, які не можуть бути надруковані через обмеження принтера або процесу друку. Сюди відносяться елементи, які не можуть бути надруковані, оскільки вони занадто малі або занадто тонкі, або які не можуть бути відтворені принтером, оскільки вони занадто складні або занадто крихкі.

Форми, що не піддаються друку, становлять виклик для дизайнерів. У деяких випадках моделі можуть потребувати повного перепроектування, щоб усунути елементи, які не піддаються друку.

6. Погано спроектовані стики і з'єднання - під час 3D-друку можуть виникнути проблеми, які можуть спричинити дефекти і пошкодження надрукованого об'єкта. З'єднання між окремими частинами 3D-моделі повинні бути належним чином спроектовані, щоб забезпечити належне прилягання деталей і функціонування кінцевого надрукованого об'єкта. З'єднання між окремими частинами 3D-моделі повинні бути правильно спроектовані, щоб забезпечити належне з'єднання деталей і функціонування кінцевого надрукованого об'єкта.

Проаналізувавши наведені вище типові помилки, що виникають під час 3D-моделювання об'єкта, запропоновано послідовність перевірки 3D-моделі на наявність типових помилок та рішення, необхідні для їх усунення (табл. 1).

Таблиця 1 – Послідовність перевірки під час 3D-моделювання та потрібні рішення для усунення типових помилок

Етап перевірки	Дефект	Опис дефекту	Потрібне рішення
1	Геометрія, яка не друкується	Об'єкти, які не можна надрукувати, наприклад внутрішні порожнечі або западини	Видалити недруковану геометрію або доопрацювати дизайн, щоб зробити його придатним для 3D-друку
2	Помилки товщини стінки	Занадто тонкі або товсті стінки спричиняють надмірне або недостатнє видавлювання матеріалу, що має вплив на міцність виробу	Відредагувати товщини стінок відповідно до параметрів сопла 3D-принтера та використовуюваного матеріалу
3	Неправильний масштаб	Модель неправильно масштабована для 3D-друку, що призводить до надто великих або замалих елементів моделі	Підібрати масштаб моделі відповідно до технологічних розмірів виробу та параметрів 3D-принтера
4	Виступи та невідтримувана геометрія	Виступи або невідтримувані ділянки 3D-моделі, що призводять до провисання матеріалу	Доопрацювати 3D-модель щодо необхідної геометрії додаткових опорних конструкцій або визначити положення технологічних підтримок 3D-принтера
5	Погано сконструйовані з'єднання	Конструкційні з'єднання 3D-моделі, які не відповідають технологічним вимогам 3D-принтера, призводять до того, що елементи деталі втрачають спряженість поверхонь	Доопрацювати елементи конструкції з'єднань 3D-моделі відповідно до технологічних вимог, а саме: додати елементи фаски, округлення, ребра жорсткості
6	Неоднорідна геометрія	Поверхні, які перетинаються або є неоднорідними, спричиняють помилки під час створення траєкторії руху друкуючої головки, що призводить до утворення дефектів порожнин в середині виробу	Корегування моделі за допомогою програмного забезпечення, яке може ідентифікувати та виправляти неоднорідну геометрію, наприклад Meshmixer або Netfabb

Загальні рекомендації, яких слід дотримуватися при розробці моделей виробів у програмному середовищі та використанні 3D-друку для їх виготовлення, були отримані авторами з власного досвіду. Тому було створено таблицю з використанням найпоширеніших матеріалів та рекомендованих параметрів для досягнення найкращих результатів, мінімізації браку та відходів, а також оптимізації часу виготовлення виробу.

Таблиця 2 – Рекомендовані параметри принтера для досягнення найкращих результатів

Налаштування принтера				Вимоги до 3D моделі		Експлуатаційні характеристики			
Матеріал	Діаметр сопла, мм	Швидкість друку, мм/с	Температура друку, °C	Мінімальна товщина стінки виробу, мм	Мінімальні розміри виробу, мм	Міцність (на розрив), МПа	Максимальне навантаження, кг	Максимальна температура експлуатації, °C	Використання в агресивному середовищі
PLA	0,2	20-50	190-220	0,6-0,8	2x2x2	20-40	20-30	60-65	ні
	0,4	40-80		0,8-1,2	4x4x4	40-60	30-40		
	0,6	60-100		1,2-1,8	6x6x6	60-80	40-50		
ABS	0,4	30-70	230-260	1,2-1,6	8x8x8	40-60	40-60	80-85	так
	0,6	50-80		1,6-2,0	10x10x10	60-80	60-80		
PETG	0,2	20-40	220-250	0,8-1,2	4x4x4	40-60	40-60	70-80	так
	0,4	40-60		1,2-1,8	6x6x6	55-75	60-80		
	0,6	60-80		1,6-2,2	8x8x8	60-80	80-100		
Nylon	0,4	30-60	230-260	1,2-1,6	8x8x8	50-80	120-200	150-180	так
	0,6	60-100		1,6-2,0	10x10x10	70-100	150-300		

Примітка: друк пластиком ABS та Nylon діаметром сопла друкуючої головки 0,2 мм не рекомендовано, оскільки можливе забиття сопла та виведення з ладу обладнання.

Висновки. Щоб уникнути помилок у 3D-моделях, важливо використовувати програмне забезпечення для 3D-моделювання, спеціально розроблене для 3D-друку, і переконатися, що модель правильно змодельована та оптимізована для друку перед друком. Тестування моделі у віртуальному середовищі або на невеликому тестовому зразку також може допомогти виявити та виправити потенційні помилки перед повномасштабним друком.

У майбутньому будуть розроблені рішення для усунення типових помилок, які виникають під час 3D-моделювання об'єктів для 3D-друку, а також будуть встановлені математичні логічні умови для оцінки 3D-моделей з метою забезпечення показників якості для технології FDM.

Інформаційні джерела

- Larson, H.: *Fabricated: The New World of 3D-Printing*. Wiley. 2013. 280 p.
- Javada, M., Haleema, A., Pratap Singh, R., Sumanc, R., Rab, S.: Role of additive manufacturing applications towards environmental sustainability. In: *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4 (4), pp. 312-322. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.07.005>.
- Kirchheim, A., Dennig, H., Zumofen, L.: Why Education and Training in the Field of Additive Manufacturing is a Necessity. In: *International Conference on Additive Manufacturing in Products and Applications*, 2018. pp. 329-336. URL: https://www.researchgate.net/publication/319509716_Why_Education_and_Training_in_the_Field_of_Additive_Manufacturing_is_a_Necessity.
- Sabrie, S.: Additive manufacturing technology – 3D printing and design – the 4th industrial revolution. 2020. 417p.
- Pandya, H. 3D printing technology: fundamentals and application. 2021. 416 p.
- Smyth, Clifford T.: *Designing 3d printed things for everyday use - 3rd edition Paperback*. In: *Functional Design for 3D Printing*. June 26, 2017. 236p.
- Torta, S., Torta, J.: *3D Printing: An Introduction Illustrated Edition*. 2018. 370p.
- Iurii Lukianchuk, Yurii Tulashvili, Volodymyr Podolyak, Roman Horbariuk, Vasyl Kovalchuk, Serhii Bazyl. Didactic Principles Of Education Students 3D-printing // *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, VOL.22 No.7, July 2022. <https://doi.org/10.22937/IJCSNS.2022.22.7.54>
- O. Surynovych, M. Rudynets, I. Lukianchuk and I. Kondius, "QR and 3D Technologies

Integration in Children's Safety Projects," 2022 12th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/DESSERT58054.2022.10018666.

10. <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/create-3d-file/fix-non-manifold-geometry/>

11. https://www.researchgate.net/figure/Both-actual-part-height-H-and-overhang-angle-will-deviate-from-the-required_fig1_338051158

Marchuk V., Tulashvili Y., Lukyanchuk Y.

Lutsk National Technical University

TRAINING OF 3D PRINTING SPECIALISTS USING FDM TECHNOLOGY

Ukraine faced a number of problems in the development of 3D technologies, which were identified during the analysis of previous studies. However, there are opportunities to improve the situation in this field in the future. To achieve this goal, a study of the educational process for specialists working in the field of 3D technologies was conducted. This was analyzed in order to identify possible shortcomings and suggestions for improving the educational process. As a result, special educational content has been developed that covers key aspects of 3D printing. This content is intended for training specialists in 3D printing and provides the necessary knowledge and skills to effectively work with this technology. In addition, a list of recommendations was compiled, aimed at describing the experience of using 3D technologies and eliminating defects that arise during the manufacture of products using additive technologies. These recommendations will help to improve the production process and ensure high quality of finished products. In general, these measures aim to improve the state of 3D technologies in Ukraine. The implementation of educational content and recommendations will help increase the number of qualified specialists in this field, improve the quality of production and contribute to the further development of 3D technologies in the future.

Key words: software, education, formal, informal and informal education, 3D printing defects, 3D technologies.