

ДОДАТОК А

Апробація матеріалів у формі доповіді на конференції

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки

**IX Міжнародна Конференція
ВИРОБНИЦТВО
&
МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ 2025**



**IX International Conference
MANUFACTURING
&
MECHATRONIC SYSTEMS 2025**

M&MS

2025

IX International Conference
25-26 October
Kharkiv

M&MS 2025, 24-25 October, Kharkiv, UKRAINE

| | |
|--|----|
| Review and Selection of Optimal Sensors for Building a Production Facility Microclimate Monitoring System | 50 |
| <i>Tymofii Cherednichenko, Svetlana Sotnik</i> | |
| Features of Automatic Working Time Control Systems | 54 |
| <i>Максим Лисун, Дмитро Нікітін</i> | |
| Конструкція та технологія LCD друку та основні параметри слайсерів для фотополімерного друку | 58 |
| <i>Микола Церцек, Дмитро Нікітін</i> | |
| Дослідження впливу параметрів сушки філаменту на якість друку | 62 |
| <i>Anton Andreiev, Svetlana Sotnik</i> | |
| “Web application security: protection against modern cyber threats” Overview of key vulnerabilities (XSS, CSRF, SQL injections), protection methods, use of HTTPS, authentication, and authorization | 66 |
| <i>Ivan Dolhosheia, Oleksandr Tymbal</i> | |
| Methods of Automated Monitoring and Control System of Greenhouse Complex | 71 |
| <i>Svitlana Maksymova, Pavlo Shakhov</i> | |
| Development of a Model for Decentralized Control of a Group of Collaborative Robot Manipulators | 76 |
| <i>Stetsenko Kateryna</i> | |
| Integration of Artificial Intelligence in Assistive Robots: Challenges and Opportunities | 80 |
| <i>Вадим Онищенко, Олександр Малій, Вадим Мірошніченко</i> | |
| Використання методів комп’ютерного зору та штучного інтелекту для автоматизації підготовки САД-документації друкованих плат | 83 |
| <i>Дмитро Янушкевич, Леонід Іванов, Ігор Толкунов</i> | |
| Застосування інтелектуальних систем управління робототехнічними системами для досягнення цілей сталого розвитку у сфері гуманітарного розмінування | 88 |
| <i>Vitalii Ovcharenko, Olena Tokarieva</i> | |
| | 92 |

Конструкція та технологія LCD друку та основні параметри слайсерів для фотополімерного друку

Максим Лисун¹, Дмитро Нікітін¹

¹ Кафедра КІТАР, Харківський національний університет радіоелектроніки, УКРАЇНА, Харків, пр. Науки, 14., email: maksym.lysun@nure.ua

Анотація: У роботі досліджена конструкція принтера для LCD друку та проведений аналіз основних параметрів існуючих слайсерів для фотополімерного друку.

Ключові слова: 3D-друк, FFF/FDM технологія, вплив параметрів, слайсер, LCD, УФ.

I. ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку адитивних технологій 3D-друк посідає провідне місце серед методів швидкого прототипування та виготовлення дрібносерійної продукції. Одним із найперспективніших напрямів є фотополімерний друк, що ґрунтується на поетапному затвердінні рідких смол під дією світлового випромінювання. Серед різновидів фотополімерного друку особливе поширення набув метод LCD друку, який вирізняється високою точністю відтворення деталей, відносною доступністю обладнання та можливістю створення виробів зі складною геометрією.

Аналіз конструкції 3D-принтера для LCD друку є важливим з огляду на необхідність оптимізації його механічних і оптичних вузлів з метою підвищення якості друку та зменшення собівартості процесу. Особливого значення набуває дослідження параметрів слайсерів, такого спеціалізованого програмного забезпечення, що виконує перетворення тривимірних моделей у набір інструкцій для друку. Вибір і коректне налаштування таких параметрів, як товщина шару, час експозиції, швидкість підйому платформи тощо, безпосередньо впливають на точність відтворення моделі, міцність готових виробів та ефективність використання матеріалів.

II. ТЕХНОЛОГІЯ ФОТОПОЛІМЕРНОГО LCD ДРУКУ

Технологія фотополімерного LCD друку (або MSLA) – це метод 3D-друку, який поширено затверджує рідку фотополімерну смолу під дією ультрафіолетових світлодіодів та LCD-маски. Спеціальна LCD-матриця формує зображення кожного шару, пропускаючи світло тільки там, де необхідно затвердити матеріал, що дозволяє створювати об'єкти з високою точністю, деталізацією та гладкою поверхнею [1, 2].

Принцип роботи LCD друку ділиться на декілька провідючих етапів. Першим і найпростішим є етап з підготовки смоли: у ванночку принтера заливається рідка фотополімерна смола. Після цього платформа для друку опускається у смолу, а зверху розташовується LCD-дисплей та УФ-світлодіоди, цей етап частіше за все називають засвіткою. УФ-світлодіоди світять через LCD-маску, яка пропускає світло лише через певну ділянку. Ця ділянка смоли полімеризується та твердіє, формуючи один шар об'єкта. Платформа піднімається і процес засвітки повторюється, накладаючи наступний

шар поверх попереднього, доки модель не буде повністю сформована.

Конструкція принтера будується лише по системі знизу-вгору, так як основне джерело зображення та УФ випромінювання знаходяться знизу принтера, рис. 1.

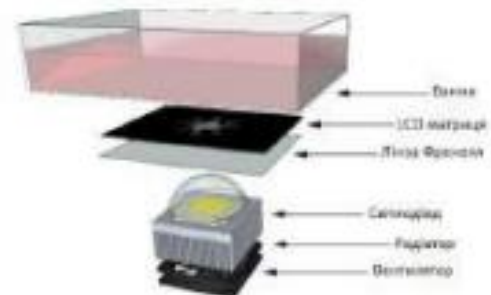


Рис. 1. Типова конструкція принтера по технології LCD

Як джерело ультрафіолетового випромінювання зазвичай застосовують світлодіод або світлодіодну матрицю, випромінювання якої проходить через екран і потрапляє на дно ванни, рис. 2. Основною особливістю таких джерел є їхній спектр випромінювання, який знаходиться в діапазоні від 390 до 415 нм. Саме цей діапазон обирають завдяки властивостям фотополімерів, що найефективніше полімеризуються під дією ультрафіолетового випромінювання зазначених довжин хвиль. Використання інших діапазонів призводить до зниження швидкості та якості засвітлення. Відхилення довжини хвилі може викликати неповну полімеризацію моделі, що стане причиною браку [3].

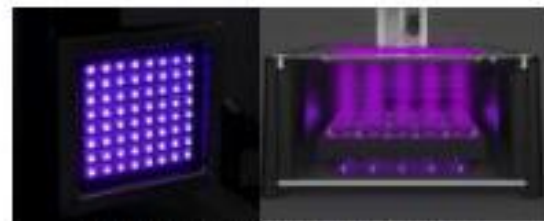


Рис. 2. Приклади світлодіодних матриць

Технологія такого друку стала можливою тоді, коли було запропоновано використовувати LCD екрани, а якості світлопропускної маски, звідси і назва технології друку, бо такий екран є її основою. Але тільки після того, як були вивірені елементи, що заважають проходженню УФ випромінювання, а саме підсвітка та поляризаційна плівка, використання таких екранів стало можливим у фотополімерному друці. В результаті видалення зайвих елементів проходження УФ випромінювання через

екран з мінімальними втратами стає можливим і залишається шар, який безпосередньо відповідає за формування зображення. Для формування цього шару використовуються білі та чорні пікселі. Білі пікселі мають максимальне пропускання ультрафіолету, чорні ж навпаки, блокують його проходження. Таким чином підставляючи під екран джерело ультрафіолетового випромінювання, можливо регулювати подавання УФ світла на друковану область [4].

Якість друку моделі та її роздільна здатність по осях X та Y безпосередньо визначаються характеристиками LCD-екрана, а зокрема його фізичними розмірами та роздільною здатністю. Для екранів із розмірами 100×50 мм і роздільною здатністю 2К друк забезпечує точність близько 35-39 мкм по осях X-Y. Якщо ж використовувати екран з роздільною здатністю 4К при тих самих розмірах 100×50 мм, то розмір пікселя становитиме вже 23-26 мкм, що дозволить досягти значно вищої деталізації моделі, рис. 3.



Рис.3. Порівняння надрукованих деталей з використанням екранів з різними розмірами пікселя

III. Аналіз параметрів слайсерів для фотополімерного друку

Слайсери для фотополімерного 3D-друку – це спеціальні програми, які перетворюють 3D-модель у набір інструкцій для принтера, щоб він міг надрукувати деталь шар за шаром. Всі ці шари виводяться на LCD екран для подальшої побудови моделі. У своєму складі вона має файл G-code, який використовуючи команди для керування ЧПК верстатами, здійснює технологічні операції принтера, такі як вмикання світлодіодної матриці, перехід від однієї картинки шару до іншої, контролює процес переміщення та інше, рис. 4.

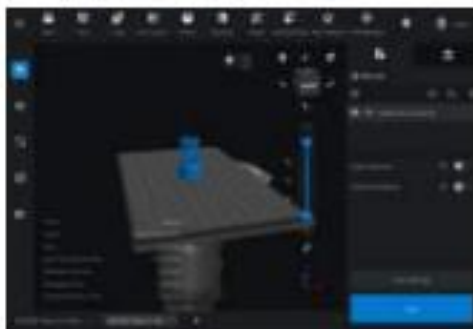


Рис.4. Програма ChituBox для фотополімерного 3D-друку

У випадку фотополімерного друку слайсери виконують декілька ключових задач [5, 6]:

- розрізає модель на шари що переводить 3D-модель у послідовність 2D-зображень, які відповідають кожному шару друку;
- генерує підтримки та створює опори, щоб деталь не «висіла в повітрі» під час друку;
- додає основу та інші допоміжні структури для надійного прилипання деталі до платформи;
- налаштовує параметри друку: товщина шару (наприклад, 0.025 мм або 0.05 мм), час експозиції для кожного шару, швидкість підйому платформи, антиаліасинг, компенсацію усадки;
- генерує фінальний файл у форматі, який розуміє конкретний принтер (наприклад, *.cbddlp, *.photon, *.sl1, .ctb тощо).

Основою кожного слайсеру є G-code, рис. 4. В першій секції міститься технічна інформація, яка може виводитися на екрані принтера, така як очікуваний час друку, загальна вага, загальна кількість шарів та ін. Наступними командами є ті, що виконуються при старті друку, такі як G28 Z0, тобто відправити платформу в нульову точку осі Z, для визначення точного місцезнаходження, або M21, що визначає систему координат в мм. G90 встановлює абсолютну систему координат, що виконує переміщення по координатам такого формату: G0 Z190, тобто переміщення в позицію 190 мм від домашнього положення. Далі вже йдуть команди, які безпосередньо виконуються для побудови моделі, це переміщення осі та подача матеріалу, рис. 5.



Рис.5. Інформаційна секція G-code

Окрім налаштувань коду та самого процесу друку є багато загальних параметрів принтера та слайсеру які сильно впливають на кінцевий результат друку.

Насамперед це температура. Температура насадки є найважливішим параметром у слайсері, тому що без

чіткого рівня тепла жоден друк не буде працювати коректно. Коли оператор починає друкувати новою ниткою, перше що він налаштовує на слайсері, це температура сопла. Порівняти кінцевий результат можна надрукуювши температурну вежу, щоб побачити, які значення працюють найкраще, рис. 6. Занадто висока температура сопла призведе до надмірної екструзії з плямами по всьому друку. В свою чергу, занадто низька температура спричинить недостатню екструзію, коли не всі шари будуть надруковані повністю [7].



Рис.6. Порівняння екструзії при різних температурах сопла

Потік (flow), відомий також як коефіцієнт екструзії, визначає швидкість, з якою нитка екструдеться. Наприклад, при 100-відсотковому показнику потоку принтер може використовувати 10 см нитки для певної деталі, але якщо змінити витрату на 90 відсотків, для тієї самої функції знадобиться лише 9 см. Зрештою, регулювання потоку впливає на кількість обертів двигуна екструдера на міліметр навесеного матеріалу. Потік можна використовувати для обліку надмірної або недостатньої екструзії на принтері без коригування параметра електронного кроку принтера, значення якого зберігається у мікропрограмі. Найкращим рішенням буде налаштувати значення кроку під час калібрування принтера та налаштувати потік відповідно до конкретних завдань друку, рис. 7.



Рис.7. Налаштування потоку може допомогти надмірній екструзії

Підтримки або опори є ще одним важливим параметром слайсера. Підтримки – це конструкції, які утримують виступаючі елементи моделей. Параметри які зазначають у слайсері включають у себе кут завсу і мінімальну площу опори [8]. Перший визначає

мінімальний кут, який повинен становити зв'яз, перш ніж слайсер створить опору для його утримання. Останній визначає мінімальну площу, яку має мати опорна структура, щоб бути включеною в друк. Інші параметри та параметри підтримки також дуже важливі, рис. 8.



Рис.8. Налаштованих параметрів підтримок

Наприклад, орієнтація частини відіграє ключову роль у створенні опорних структур. Інші параметри підтримки включають швидкість друку, підтримку щільності заповнення тощо. Слід змінювати ці параметри, щоб знайти баланс між достатнім опором та мінімальним споживанням матеріалу, рис. 9.



Рис.9. Приклад налаштованих параметрів підтримок

Заповнення – це внутрішнє наповнення деталей, надрукованих за допомогою фотополімерного друку, і є функцією, недосяжною традиційними методами виробництва, такими як наприклад лиття під тиском. Заповнення дозволяє краще контролювати міцність, вагу, витрату матеріалу та внутрішню структуру деталі без необхідності коригувати її зовнішній вигляд чи зовнішні характеристики [9]. У слайсерах заповненням можна керувати за допомогою щільності заповнення, встановленої у відсотках, і шаблоном заповнення, які є структурою або формою заповнення. Надійніші

малюнки заповнення та більша щільність заповнення подовжать час друку та споживатимуть більше матеріалів, але збільшать міцність і вагу деталі, рис. 9.

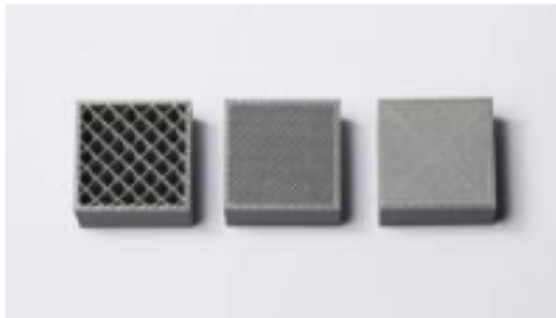


Рис.10. Вигляд однакової деталі але з різним заповненням зсередини

IV. ВИСНОВКИ

У результаті проведеного аналізу технології фотополімерного LCD-друку можна зробити висновок, що цей метод є одним із найбільш перспективних та точних способів адитивного виробництва для виготовлення виробів зі складною геометрією, високим рівнем деталізації та якісною поверхнею. Використання LCD-екранів у поєднанні з УФ-світлодіодами дозволяє створювати шари з високою роздільною здатністю, причому характеристики екрану, його фізичний розмір, роздільна здатність та розмір пікселя прямо визначають точність відтворення деталей по осях X та Y. Це відкриває можливість масштабування технології залежно від вимог до якості готової продукції.

Особливу роль у досягненні стабільного та якісного результату відіграють слайсери – спеціалізовані програмні комплекси, що готують цифрову модель до друку, оптимізуючи її орієнтацію, формуючи шари, генеруючи підтримки, задаючи параметри експозиції, швидкості руху платформи, щільності заповнення та інші критично важливі налаштування. Саме правильний вибір слайсера і точне налаштування його параметрів безпосередньо впливають на геометричну точність, міцність та надійність надрукованих деталей, а також на ефективність використання фотополімерної смоли та часу друку.

Таким чином, комплексний підхід, що включає грамотну конструкцію 3D-принтера, застосування якісних джерел УФ-випромінювання у потрібному спектрі та використання сучасних слайсерів з правильно підібраними параметрами, є запорукою підвищення точності, відтворюваності та економічності процесу фотополімерного LCD-друку. Подальший розвиток технології, імовірно, буде пов'язаний із підвищенням роздільної здатності дисплеїв, впровадженням інтелектуальних алгоритмів автоматичного налаштування друку та оптимізацією витрат матеріалів,

що зробить процес ще більш універсальним і доступним для промислового та індивідуального використання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Alfred Jacobsen, Trond Jorgensen, Qyvind Tafjord, and Endre Kirkhorn "Concepts for 3D print productivity systems with advanced DLP photoheads", Proc. SPIE 9376, Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications VII, 937605.
- [2] Нікітін, Д. О., Невилюдов, І. Ш., Жарікова, І. В., Броніков, А. І., & Стрілець, Р. Є. (2025). Розробка методу контролю виробів під час фотополімерного 3D-друку. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1) (136), 42–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335706>
- [3] І. Невилюдов, Р. Стрілець, Д. Близнюк. Забезпечення якісних показників фотополімерного 3D-друку за допомогою математичного моделювання і тестових моделей // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2024. No2 (28), С. 96-107 DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.2.096>.
- [4] Igor Nevlyudov, Dmytro Nikitin, Danylo Blyzniuk, Roman Strelets. Features of Photopolymer 3D Printing Technology. *Journal of Natural Sciences and Technologies*, 3(2), 318-322. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14542531>.
- [5] Налаштування параметрів 3D друку для роботи з фотополімерами [Електронний ресурс] / Режим доступу: https://lider-3d.ua/wiki/nastroyki-pechati-i-sovety/nastroyka_parametrov_3d_pechati_dlya_raboty_s_fotopolimerami/. – Зарод. з екрану.
- [6] Zhao, J., Wu, Y., Xue, C., Yang, S., Wang, L., Zhu, F., Zhu, Z., Liu, B., Wang, Y., Tai, R., 2017. Fabrication of High Aspect Ratio Nanoscale Periodic Structures by the Soft X-ray Interference Lithography. *Microelectronic Engineering*, Volume 170, pp. 49–53.
- [7] Kim, K.Y.; Chang, H.; Lee, W.D.; Cai, Y.F.; Chen, Y.J. The influence of blood glucose meter resistance variation on the performance of a biosensor with a gold-coated circuit board. *J. Sens.* 2019, 2019, 5948182.
- [8] Chao Sun, Roman Mikhaylov, Yongqing Fu, Fangda Wu, Hanlin Wang, Xichen Yuan, Zhihua Xie, Dongfang Liang, Zhenlin Wu, Xin Yang. Flexible Printed Circuit Board as Novel Electrodes for Acoustofluidic Devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, Volume: 68, Issue: 1, January 2021, Page(s): 393 – 398p. <https://doi.org/10.1109/TED.2020.3039760>.
- [9] Kearney, D. J., Kicin, S., Bianda, E., & Krivda, A. (2017). PCB embedded semiconductors for low-voltage power electronic applications. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 7, 387–395. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2017.2651646>.

ДОДАТОК Б
Результати дослідження

Таблиця Б.1 – Результати перевірки твердості тестових зразків

| Anycubic Standard V2 | | | | |
|-----------------------|------------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| № | Час експонування, с | Інтенсивність, Лм | Довжина хвилі, нм | Твердість, HR |
| 1 | 7 | 1600 | 405 | 65 |
| 2 | 8 | | 405 | 69 |
| 3 | 9 | | 405 | 70 |
| 4 | 10 | | 405 | 74 |
| 5 | 11 | | 405 | 73 |
| 6 | 12 | | 405 | 76 |
| 7 | 7 | | 435 | 60 |
| 8 | 8 | | 435 | 64 |
| 9 | 9 | | 435 | 67 |
| 10 | 10 | | 435 | 66 |
| 11 | 11 | | 435 | 70 |
| 12 | 12 | | 435 | 69 |
| 13 | 7 | 2800 | 405 | 70 |
| 14 | 8 | | 405 | 75 |
| 15 | 9 | | 405 | 77 |
| 16 | 10 | | 405 | 79 |
| 17 | 11 | | 405 | 78 |
| 18 | 12 | | 405 | 82 |
| 19 | 7 | | 435 | 65 |
| 20 | 8 | | 435 | 67 |
| 21 | 9 | | 435 | 72 |
| 22 | 10 | | 435 | 70 |
| 23 | 11 | | 435 | 75 |
| 24 | 12 | | 435 | 74 |
| Elegoo Standard Resin | | | | |
| № | Час експонування, с | Інтенсивність, Лм | Довжина хвилі, нм | Твердість, HR |
| 25 | 7 | 1600 | 405 | 67 |
| 26 | 8 | | 405 | 71 |
| 27 | 9 | | 405 | 74 |
| 28 | 10 | | 405 | 76 |
| 29 | 11 | | 405 | 75 |
| 30 | 12 | | 405 | 79 |
| 31 | 7 | | 435 | 62 |
| 32 | 8 | | 435 | 66 |
| 33 | 9 | | 435 | 69 |
| 34 | 10 | | 435 | 68 |
| 35 | 11 | | 435 | 72 |
| 36 | 12 | | 435 | 71 |

Продовження таблиця Б.1

| Elegoo Standard Resin | | | | |
|-----------------------|------------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| № | Час експонування, с | Інтенсивність, Лм | Довжина хвилі, нм | Твердість, HR |
| 37 | 7 | 2800 | 405 | 72 |
| 38 | 8 | | 405 | 76 |
| 39 | 9 | | 405 | 80 |
| 40 | 10 | | 405 | 81 |
| 41 | 11 | | 405 | 83 |
| 42 | 12 | | 405 | 84 |
| 43 | 7 | | 435 | 67 |
| 44 | 8 | | 435 | 71 |
| 45 | 9 | | 435 | 74 |
| 46 | 10 | | 435 | 73 |
| 47 | 11 | | 435 | 77 |
| 48 | 12 | | 435 | 76 |

ДОДАТОК В
Демонстраційний матеріал

