

І. НЕВЛЮДОВ, Р. СТРИЛЕЦЬ, Д. БЛИЗНЮК

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ФОТОПОЛІМЕРНОГО 3D-ДРУКУ ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ І ТЕСТОВИХ МОДЕЛЕЙ

Предметом дослідження в статті є аналіз впливу технологічних параметрів фотополімерного друку на появу дефектів у процесі друку із використанням тестових моделей, що містять елементи, на яких позначається зміна технологічних параметрів. **Мета роботи** – визначення залежності між технологічними параметрами фотополімерного друку та дефектами, що виникають унаслідок друку з використанням моделей для тестування. У статті виконуються такі **завдання**: аналіз наявних тестових моделей і визначення елементів моделі та впливу на них технологічних параметрів. **Методи, що впроваджуються**: математичний аналіз у вигляді однофакторної лінійної регресії та емпіричний метод, що полягає в порівнянні та вимірюванні різниці між окремими тестовими зразками для отримання значень, які в подальшому використовуватимуться в регресійному аналізі. **Досягнуті результати**: визначено залежність технологічних факторів та їх вплив на елементи тестової моделі, що полягає в зміні фізичних розмірів тестових моделей, де за умови недостатнього часу експонування розміри моделі зменшуються та утворюються дефекти. У процесі збільшення часу експонування розміри моделі лінійно зростають, виникають дефекти у вигляді зникнення отворів або зміни їх розмірів. **Висновки**. У дослідженні, що передбачало друк тестових моделей та їх аналіз за допомогою лінійної однофакторної регресії, визначено та підтверджено залежність між часом експонування та фізичними розмірами моделі. Описано метод дослідження відповідності розмірів залежно від часу експонування з використанням тестових моделей і математичного моделювання у вигляді регресійного однофакторного аналізу. Надалі запропоновано визначити вплив висоти шару на час експонування та значущість окремих технологічних факторів, а також установити їх вплив на дефекти, що виникають унаслідок друку. Побудовано модель регресійного аналізу, визначено кореляції технологічних параметрів та їх вплив на показники якості. Установлено коефіцієнт детермінації побудованої моделі.

Ключові слова: 3D-принтер; адитивне виробництво; фотополімерний друк; регресійний аналіз; тестові моделі; математичний аналіз; дослідження.

Вступ

Нині 3D-друк стає все більш поширеним і в деяких сферах замінює інші технології. Це пояснюється низкою переваг, які має ця технологія перед класичними. Більш низькі вимоги до кваліфікації персоналу й дешеве та доступне обладнання забезпечили 3D-друку популярність у світі. Безумовно, технології 3D-друку існують дуже давно, і вони відрізняються одна від одної, але водночас це різноманіття дає змогу використовувати їх у широкому спектрі напрямів – від виробництва машин до ливарної промисловості.

Однією з багатьох технологій 3D-друку є фотополімерний друк [1]. Він дає змогу друкувати рідким фотополімером, що під дією ультрафіолетового випромінювання полімеризується з рідкого стану у твердий. Особливістю фотополімерного друку є висока роздільна здатність, якщо порівнювати з більшістю інших технологій, зокрема *FDM*, *LOM*, *3DP*, *EBF*. Якщо порівнювати фотополімерний друк

з екструзійним, як найбільш поширеним, то по осі *Z* фотополімерний друк мінімально має 30 мкм, тоді як технології *FDM* – 50 мкм. Роздільна здатність по осях *XY* у фотополімерному друці становить мінімально 25 мкм, що відповідає роздільній здатності трафаретного екрана, крізь який проходить ультрафіолетове випромінювання. У технології *FDM* роздільна здатність становить мінімально 100 мкм по осях *XY*, що відповідає розміру сопла, крізь яке проходить розігрітий філамент. Тобто, якщо порівнювати з *FDM*-технологією, фотополімерна технологія забезпечує роздільну здатність більш ніж удвічі, маючи 50 мкм роздільну здатність по осях *XY*, що робить цю технологією однією із найбільш високоточних технологій 3D-друку.

Однак для отримання бажаної якості виробів, надрукованих за допомогою фотополімерної технології, необхідно встановити технологічні параметри, за яких буде досягнута максимальна якість. Основними параметрами технології фотополімерного друку, від яких залежить якість надрукованої деталі,

є висота шару й час полімеризації. За умови збільшення висоти шару деталей набуває шорсткості відповідно до товщини шару, водночас час експонування стає тривалішим. Збільшуючи або зменшуючи час експонування, деталь змінює свої геометричні розміри, згладжуючи цим тонкі елементи в процесі збільшення часу експонування або втрачаючи їх у разі зменшення. Іншими параметрами, що впливають на вихідну якість, є час експонування базових шарів, висота перемішування та швидкість. Отже, постає проблема у визначенні залежності між технологічними параметрами та встановлення їх впливу на кінцеву якість надрукованих деталей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Фотополімерний друк поширений у різних сферах промисловості – від машинобудування до виробництва зубних протезів у медицині. Розвиток технологій виробництва електронних засобів приводить до появи нових LCD-екранів, що змінює параметри фотополімерного 3D-друку. Екрани мають більшу роздільну здатність, перехід від кольорових пікселів до монохромних дав змогу скоротити час друку та подовжити термін експлуатації самих екранів. Завдяки цьому збільшується якість отримуваних виробів і зменшується час на їх друк. Велике різноманіття фотополімерів, що використовуються у друці, відкриває нові перспективи для їх застосування. Основним напрямом досліджень у фотополімерному 3D-друці є розширення сфер упровадження та вдосконалення наявних методів і засобів друку фотополімерними смолами. Найбільш відомим для визначення технологічних параметрів є емпіричний метод із вимірюванням, що дозволяє встановити необхідні технологічні параметри для досягнення якісних показників. Недоліком цього методу є необхідність високої кількості друку тестових моделей, значні витрати матеріалу й часу.

З аналізу статей можна зробити висновок, що тема фотополімерного друку не є поширеною, наявні дослідження дають лише загальний огляд 3D-друку, не пропонуючи методів і засобів удосконалення цієї технології.

Постановка завдань і мета дослідження

Метою дослідження є аналіз наявних тестових моделей та елементів контролю, які вони містять, для визначення показників якості та впливу на них технологічних параметрів фотополімерного 3D-друку. Для виконання окресленої мети необхідно:

- визначити основні технологічні параметри фотополімерного друку;
- дослідити вплив технологічних параметрів на появу дефектів друку;
- побудувати регресійну модель впливу технологічних параметрів на якість друкованих виробів.

Кінцевим результатом є досягнення емпіричних показників, на основі яких будується кореляційно-регресійна модель впливу технологічних параметрів друку (часу експонування) на показники якості, такі як відповідність геометрії та відхилення розмірів.

Дослідження та аналіз досягнутих результатів

Технологія фотополімерного друку основана на пошаровому експонуванні світлочутливого фотополімеру, що під дією ультрафіолетового випромінювання полімеризується з рідкого стану у твердий.

Фотополімерна технологія має три основні підтипи, що відрізняються конструктивними особливостями принтерів. Перший підтип *SLA* [7] джерелом ультрафіолетового (УФ) випромінювання використовує лазер, що одночасно полімеризує фотополімер і формує горизонтальний переріз моделі за допомогою системи відхилення лазерного променя – сканатора (рис. 1).

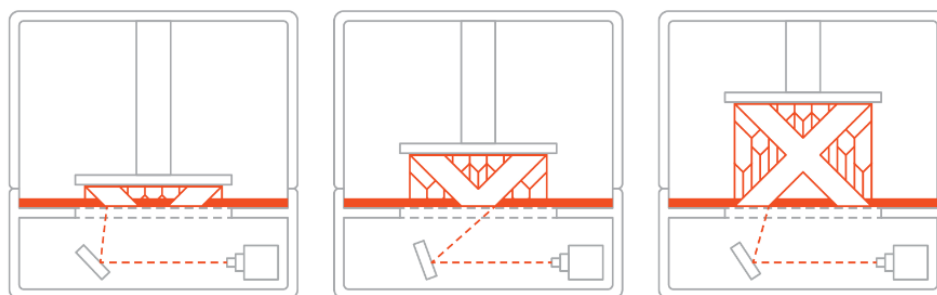


Рис. 1. Технологія фотополімерного друку SLA

Другий підтип фотополімерної технології – *DLP* [8] – для фотополімеризації застосовує проєктор з *DLP*-матрицею, що затемнює окремі елементи,

крізь які не проходить УФ-випромінювання, формує та полімеризує шар одночасно по всьому перерізу моделі (рис. 2).

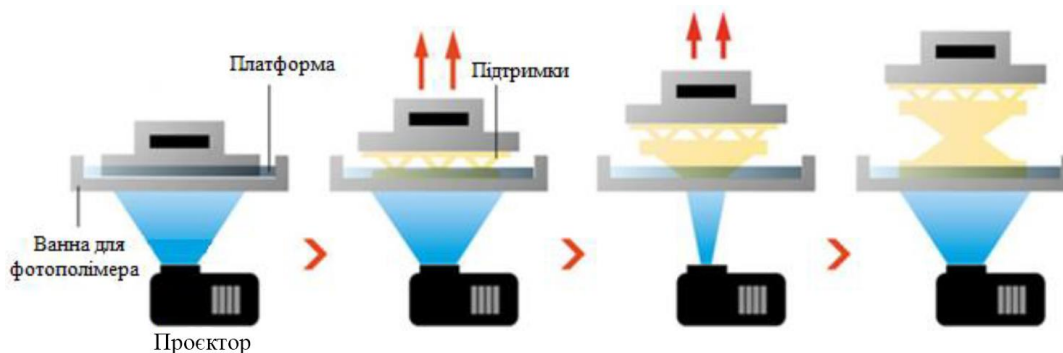


Рис. 2. Технологія фотополімерного друку *DLP*

Останнім підтипом фотополімерної технології є *LCD* [5], що містить УФ світлодіодну матрицю та маскувальний екран, який створює горизонтальний переріз моделі. Цей переріз, як і в технології *DLP*, має прозорі та непрозорі елементи. Прозорі пікселі здатні пропускати крізь себе УФ-випромінювання, що утворено світлодіодною матрицею. Непрозорі пікселі не пропускають це випромінювання, завдяки чому чорно-білий горизонтальний переріз здатний формувати шари моделі (рис. 3).

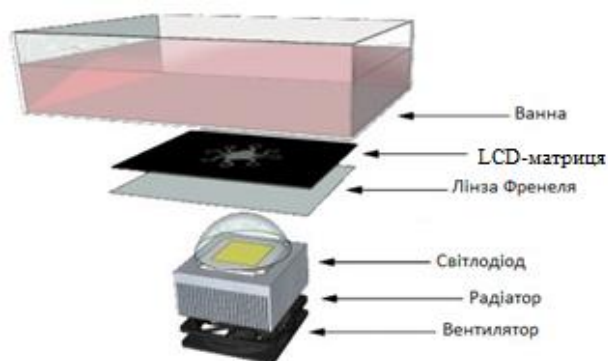


Рис. 3. Технологія фотополімерного друку *LCD*

Фотополімерний *LCD* 3D-принтер містить джерело УФ-випромінювання – світлодіодну матрицю, екран, ванну з прозорим і гнучким дном і платформу, що рухається по осі *Z*.

За вертикальну роздільну здатність принтера відповідає вісь *Z*, на яку кріпиться платформа. Загалом роздільна здатність по вертикалі становить від 30 мкм. За роздільну здатність по осях *XU* відповідає екран. Мінімально можливе значення роздільної здатності відповідає розміру пікселя

екрана. За умови роздільної здатності екрана 1620x2560 розмір пікселя становить 40 мкм.

Отже, будова принтера визначає технологічні параметри, від яких залежить надрукована модель.

Першим технологічним параметром є час експонування. Цей параметр поділяється на час експонування базових шарів, що забезпечують надійне з'єднання перших шарів моделі з платформою, та час експонування звичайних шарів. Зазначені параметри залежать від трьох факторів: фотополімер, система експонування принтера та екран. Фотополімер – рідина, в основі якої містяться різні хімічні речовини, які мають різну чутливість до УФ-випромінювання, а також може містити різні домішки, що додають різних властивостей фотополімеру та змінюють вплив на нього УФ-випромінювання. Серед таких домішок можуть бути речовини, що додають еластичності надрукованій моделі, або домішки, що зроблять її міцнішою. Барвники також здатні впливати на час експонування, що потребує визначення цього часу для кожного фотополімеру окремо.

Системи засвітлення в принтерах відрізняються між собою за типом використаної матриці та системою випрямлення, яка необхідна для того, щоб УФ-випромінювання потрапляло на екран рівномірно. Матриці можуть містити або один світлодіод, що має лінзу Френеля для рівномірного засвітлення всієї площі екрана, або світлодіодну матрицю з використанням світлодіодів із малим кутом розсіювання світла, або і те, і те – світлодіодну матрицю та лінзу Френеля, забезпечуючи потужне й рівномірне засвітлення (рис. 4).



Рис. 4. Світлодіодна матриця з лінзами Френеля

Останнім чинником, що впливає на час експонування, є екран. Екрани у фотополімерній технології розрізняють двох типів. Перший тип має кольорові пікселі, унаслідок чого УФ-випромінювання затримується на поверхні екрана й не проходить далі. Другий тип екрана монохромної структури, і піксель має лише два кольори – білий і чорний. Також існує можливість створення градієнта сірого. Зазначений тип екрана менше затримує УФ-випромінювання, завдяки чому час експонування може зменшуватися вчетверо-уп'ятеро. Для прикладу можна навести час експонування для звичайних екранів, що становить 12 с, тоді як принтер, що має аналогічну систему засвітлення та використовує той самий фотополімер із монохромним екраном, має час експонування 3 с.

Наступним параметром є висота шару, що регулює отриману шорсткість моделі (рис. 5). Цей параметр також поділяється на висоту шару базових шарів і на висоту шару звичайних шарів. Що більший розмір шару, то більшою буде шорсткість. У цьому разі час експонування збільшується.



Рис. 5. Моделі із шарами 25 мкм, 50 мкм та 100 мкм

Іншими параметрами, що забезпечують процес переходу між шарами, є висота та швидкість перемішування. Цей процес забезпечує рух фотополімеру на дні ванни, що не дає осаджуватися пігментам у фотополімері на дно. За низьких рівнів

фотополімеру у ванній забезпечується покриття всієї площі дна ємності фотополімером. Іншим призначенням перемішування є відрив моделі від плівки дна ванни. Через високу еластичність плівки та неповну відсутність адгезії до неї між моделлю та плівкою виникає вакуум, що ускладнює відрив моделі. За відсутності перемішування перехід на наступний шар може не здійснюватися, оскільки модель залишиться у зчепленні з плівкою.

Останнім параметром є швидкість друку, що зі свого боку поділяється на швидкість друку базових шарів і звичайних. Цим параметром регулюємо швидкість перемішування, підйом після шару та його повернення на наступний шар. Швидкий відрив моделі від плівки може спричинити розшарування, коли частина моделі або тонкі елементи моделі залишаються на плівці.

Керування принтером відбувається з використанням спеціальної програми – *G-code*, для створення якої застосовується *CAM*-система – слайсер [9]. Це програма перетворює модель на сукупність графічних зображень горизонтальних перерізів моделі (рис. 6), перехід між якими виконується за допомогою команд *G-code*.

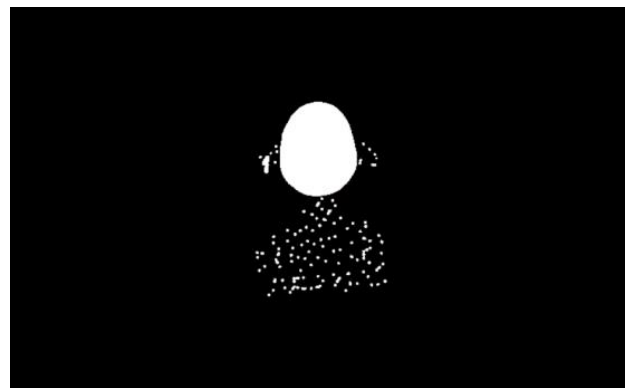


Рис. 6. Горизонтальний переріз моделі, що виводиться на екран

Ця програма налаштовує всі технологічні параметри, зазначені вище (рис. 7).

Крім того, дає змогу маніпулювати моделлю, її розмірами та орієнтацією, а також застосовувати підтримки – друквані елементи, що встановлюються під навислі частини моделі (рис. 8).

Для визначення впливу технологічних параметрів на вихідні показники якості друкваної моделі у фотополімерному 3D-друці використовуються тестові моделі, що дають змогу побудувати модель керування якісними показниками. Унаслідок аналізу

надрукованих тестових моделей можна встановити залежність між технологічними параметрами та їх

вплив на показники якості, що визначаються виникненням дефектів.

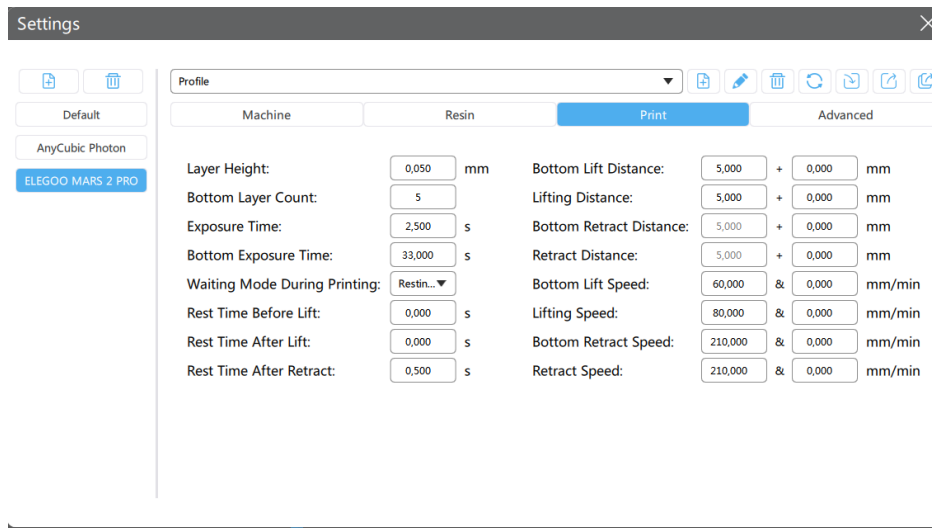


Рис. 7. Вікно параметрів слайсера

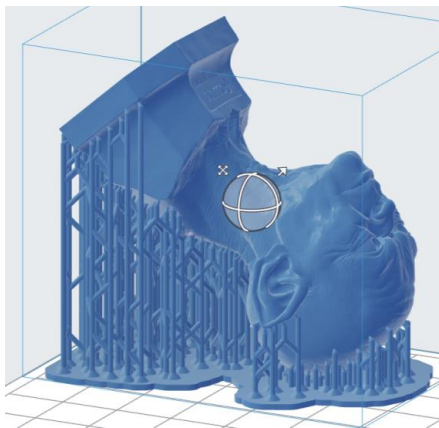


Рис. 8. Налаштована модель із використанням підтримок

Нині існує значна кількість тестових моделей, призначених для визначення основних технологічних параметрів: часу експонування, висоти шару, часу експонування базових шарів, висоти підйому та швидкості.

Розробники тестових моделей намагаються брати до уваги можливість виникнення різноманітних дефектів, щоб створити модель, яка буде очікувано змінюватися в разі зміни технологічних параметрів друку. В одній моделі зазвичай містяться декілька окремих тестів, що показують окремі дефекти та відхилення технологічних параметрів.

Тестові моделі зображені на рис. 9.

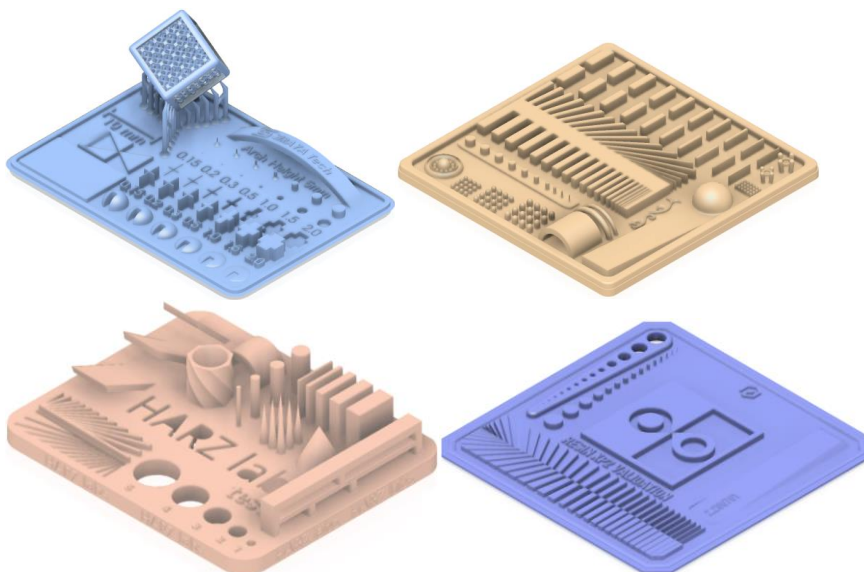


Рис. 9. Тестові моделі, за якими визначаються технологічні параметри фотополімерного друку

Для встановлення впливу технологічних параметрів на результати друку обрано одну тестову модель, що може очікувано змінити якісні показники, на основі чого буде побудовано модель регресійного аналізу.

Тестовою була модель від *Syraya Tech*, що містить п'ять тестових елементів, які змінюються унаслідок заданої відстані (рис. 10).

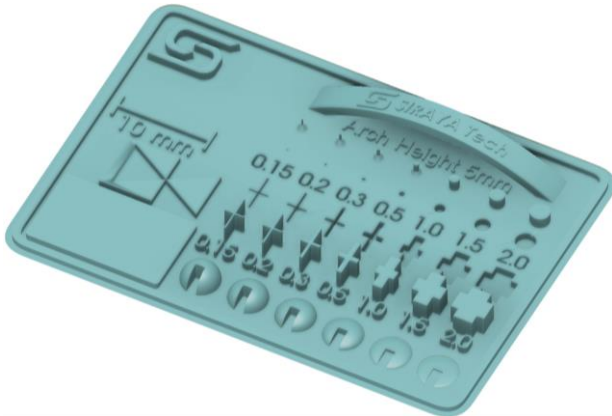


Рис. 10. Тестова модель *Syraya Tech*

Тестова модель з розмірами 48,72x34,41x5,24 має сім циліндрів і сім отворів, що змінюють свої розміри від 0,15 мм до 2 мм. Наступним елементом є набір семи хрестоподібних елементів зі стінками завтовшки від 0,15 мм до 2 мм та набір сфер заввишки від 0,15 мм до 2 мм. Додатковими елементами є арка заввишки 5 мм.

Застосовуючи цю модель, можна точно визначити такі технологічні параметри:

- час експонування базових шарів;
- час експонування звичайних шарів;
- товщину базових шарів;
- товщину звичайних шарів;
- висоту перемішування;
- швидкість переміщення осі Z.

Для побудови математичної моделі надруковано сім тестових моделей із різним часом експонування (рис. 11).



Рис. 11. Надрукована тестова модель

Час експонування шарів змінюється з кроком 0,25 с, від 1,5 с до 3 с. Час базових шарів сталий і становить 33 с. Підйом перемішування – 5 мм, швидкість перемішування – 80 мм/хв (рис. 12).

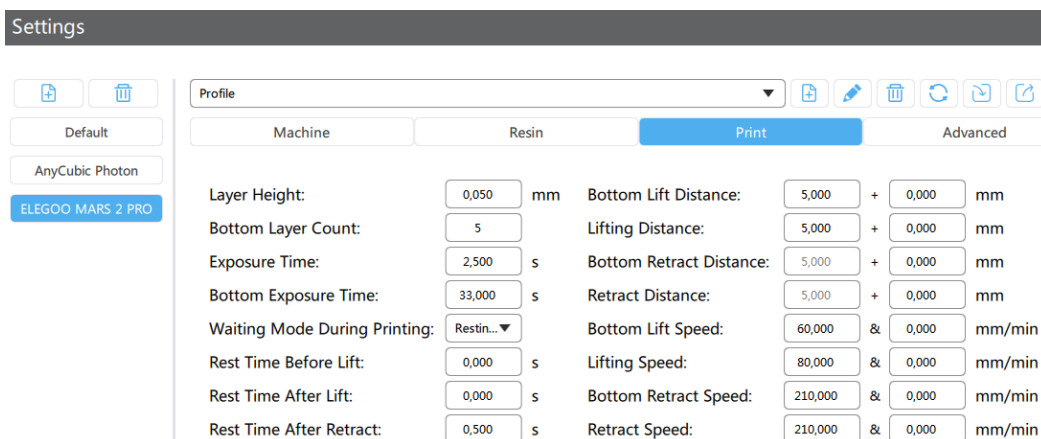


Рис. 12. Параметри друку тестових моделей

Тестові зразки друкувалися на модифікованому принтері *Anycubic Photon*, на який встановили монохромний екран і який має систему засвітлення з однією світлодіодною матрицею та розтрубом (рис. 13).

Унаслідок друку отримано сім тестових моделей з різним часом експонування. Для визначення результатів використовується штангенциркуль із точністю ± 30 мкм. Результати подані в табл. 1. На наступному етапі дослідження встановлено,

що визначити точний розмір менших елементів неможливо, тому для уточнення даних із семи тестових елементів (циліндрів, отворів) було взято два найбільших за розміром тестових елементи розміром 2 мм та 1,5 мм.

З огляду на показники таблиці можна встановити, що в разі зміни часу експонування змінюються геометричні розміри моделі. У тестових моделях із найкоротшим часом експонування візуально можна побачити дефекти на моделі, що мають вигляд відсутності найменших елементів (рис. 14).



Рис. 13. Фотополімерний принтер Anycubic Photon

Таблиця 1. Результати експериментальних досліджень

Тестовий зразок	Час експонування шарів, секунди	Тестовий елемент: циліндри, мм		Тестовий елемент: хрестоподібні елементи, мм		Тестовий елемент: циліндричні отвори, мм		Тестовий елемент: хрестоподібні отвори, мм	
		2 мм	1.5 мм	2 мм	1.5 мм	2 мм	1.5 мм	2 мм	1.5 мм
1	1,50	1,87	1,40	1,84	1,41	1,73	1,55	2,12	1,67
2	1,75	1,95	1,45	1,90	1,47	1,80	1,53	1,95	1,54
3	2,00	2,00	1,48	2,07	1,55	1,81	1,54	1,98	1,55
4	2,25	2,10	1,61	2,23	1,63	1,70	1,31	1,93	1,44
5	2,50	2,19	1,63	2,20	1,78	1,26	0,50	1,85	1,30
6	2,75	2,11	1,66	2,18	1,80	1,47	0,69	1,87	1,41
7	3,00	2,30	1,73	2,39	1,77	1,61	1,16	1,72	1,35

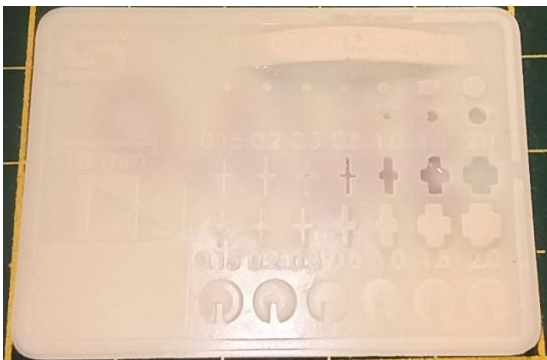


Рис. 14. Тестова модель із дефектом

Для підтвердження візуальних спостережень необхідно провести математичний аналіз у вигляді лінійного однофакторного регресійного аналізу [10] з метою визначення залежності між часом експонування та розмірами елементів. Рівняння лінійної регресії має такий вигляд:

$$Y = b1 \cdot X + c. \quad (1)$$

Розрахунок моделі регресійного аналізу проведено в *EXCEL*, унаслідок чого досягнуто певних результатів для тестових циліндрів із діаметрами 2 мм та 1,5 мм (див. табл. 2).

Таблиця 2. Результат регресійного аналізу залежності розміру тестових циліндрів від часу експонування

SUMMARY OUTPUT		RESIDUAL OUTPUT						
Regression Statistics		Observation	Predicted Y	Residuals				
Multiple R	0,98186815	1	1,530753	-0,03075				
R Square	0,96406506	2	1,751107	-0,00111				
Adjusted R Square	0,94609758	3	1,883683	0,116317				
Standard Error	0,12538556	4	2,43696	-0,18696				
Observations	7	5	2,535651	-0,03565				
		6	2,644582	0,105418				
ANOVA		7	2,967265	0,032735				
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	2	1,687113849	0,843557	53,65613	0,00129132			
Residual	4	0,062886151	0,015722					
Total	6	1,75						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95,0%	Upper 95,0%
Intercept	-4,5718651	0,741585605	-6,16499	0,003514	-6,630836798	-2,512893	-6,6308368	-2,5128934
X Variable 1(тестовий циліндр 2.0 мм)	0,18188817	1,261614613	0,144171	0,892337	-3,320915544	3,6846919	-3,3209155	3,68469189
X Variable 2(тестовий циліндр 1.5 мм)	4,11606198	1,508825415	2,727991	0,052552	-0,07310896	8,3052329	-0,073109	8,30523291

За результатами регресійного аналізу коефіцієнт детермінації становить 96%, що підтверджує залежність отриманих розмірів від часу експонування. Коефіцієнт *X Variable 1* відповідає тестовому циліндру з діаметром 2 мм, *X Variable 2* відповідає тестовому

циліндру з діаметром 1,5 мм. Також отримано графіки підбору та графіки залишків (рис. 15).

Далі проаналізовано залежність між часом експонування та хрестоподібними елементами зі стінками завтовшки 2 мм та 1,5 мм (див. табл. 3).

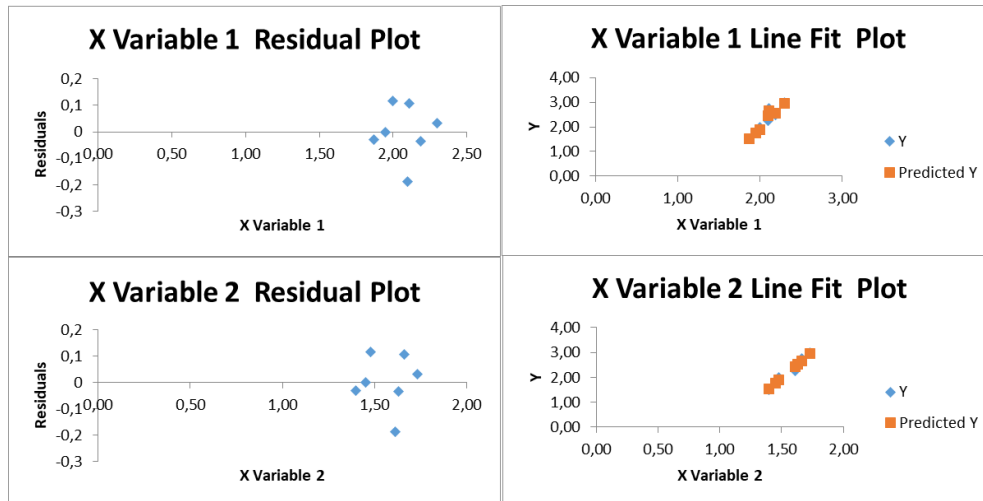


Рис. 15. Графіки підбору та графіки залишків

Таблиця 3. Результат регресійного аналізу залежності розміру хрестоподібних елементів із стінками завтовшки 2 мм та 1,5 мм від часу експонування

SUMMARY OUTPUT		RESIDUAL OUTPUT							
Regression Statistics		Observation	Predicted Y	Residuals					
Multiple R	0,9780182	1	1,485568	0,0144317					
R Square	0,9565196	2	1,676426	0,0735741					
Adjusted R Square	0,9347795	3	2,03529	-0,03529					
Standard Error	0,1379226	4	2,382555	-0,132555					
Observations	7	5	2,650925	-0,150925					
		6	2,66815	0,0818499					
ANOVA		7	2,851086	0,1489138					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>				
Regression	2	1,673909384	0,836955	43,997788	0,001890541				
Residual	4	0,076090616	0,019023						
Total	6	1,75							
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>	
Intercept	-3,4983227	0,623878319	-5,60738	0,0049684	-5,23048665	-1,766159	-5,23048665	-1,7661588	
X Variable 1 (хрестоподібний елемент 2.0 мм)	1,1598539	0,596917767	1,943072	0,1239393	-0,49745547	2,817163	-0,49745547	2,8171634	
X Variable 2 (хрестоподібний елемент 1.5 мм)	2,0211062	0,726342904	2,782579	0,0496873	0,004455049	4,037757	0,00445505	4,0377574	

Унаслідок аналізу досягнуто показників, що також підтверджують залежність розмірів від часу експонування, коефіцієнт детермінації становить 95,6%, що повторює результат попереднього регресійного аналізу. У цьому моделюванні

коефіцієнт *X Variable 1* відповідає хрестоподібному елементу зі стінкою завтовшки 2 мм, *X Variable 2* відповідає хрестоподібному елементу зі стінкою завтовшки 1,5 мм. Крім того, отримані графіки залишків і підбору (рис. 16).

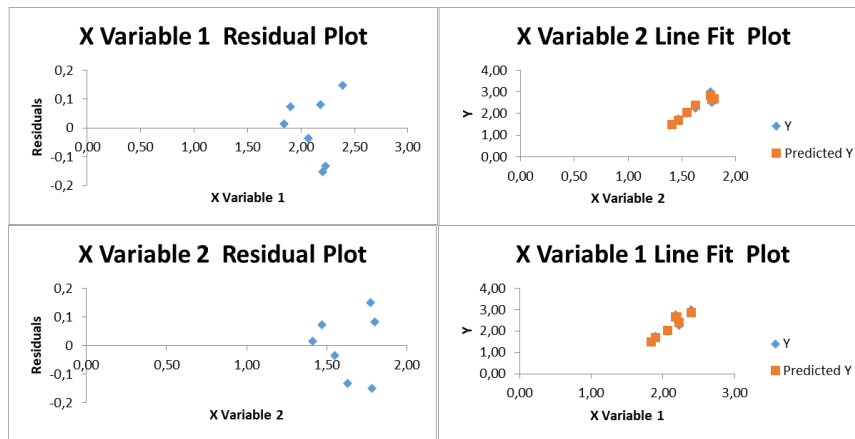


Рис. 16. Графіки підбору та графіки залишків для хрестоподібних елементів

Висновки

Під час досліджень встановлено та підтверджено, що час експонування у фотополімерному друці є ключовим технологічним параметром, що впливає на основні показники якості отриманої моделі, тобто на геометричні розміри. За умови скорочення часу, необхідного на експонування шару, геометричні розміри зменшуються, спричиняються дефекти, за яких тонкі елементи відсутні. У разі зростання часу експонування елементи збільшуються, що також може призводити до дефектів, коли отвори, що є в моделі, запливають фотополімерною смолою та зникають.

Унаслідок друку семи тестових елементів із часом від 1,5 с до 3 с визначено час експонування, що забезпечує найбільше збереження встановлених геометричних розмірів на 2 с, де відхилення від розмірів становить до 50 мкм. Це є кращим

результатом, якщо порівнювати з іншими тестовими зразками.

Отже, із застосуванням математичного моделювання в поєднанні з друком тестових моделей на фотополімерному 3D-принтері можна отримати прогнозовані геометричні розміри з мінімальним відхиленням від заданих, що дасть змогу в кінці друку досягти найбільш точного результату та мінімізувати виникнення різноманітних дефектів, на які впливає встановлений час експонування шарів.

Надалі існує необхідність проведення подібного математичного аналізу з використанням тестових моделей для встановлення залежності висоти шару, часу експонування та показників якості. Проаналізувавши залежність між технологічними параметрами та показниками якості, можна визначити метод оптимізації технологічних параметрів зі скороченням витрат матеріалів, часу та досягнення кращих показників якості.

Список літератури

1. Технології фотополімерного 3D-друку: опис, переваги та недоліки. URL: <https://monofilament.com.ua/ua/blog-novini-3d-druku-ta-additivnih-tehnologij/sla-dlp-lcd-tehnologiji-fotopolimernogo-3d-druku-opis-perevagi-ta-nedoliki>. (дата звернення: 28.05.2024).
2. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку. URL: https://nti.ukrintei.ua/wp-content/uploads/2018/05/2017-1_stat9_UA_povn.pdf (дата звернення: 04.06.2024).
3. Rajat Chaudhary, Paride Fabbri, Enrico Leoni, Francesca Mazzanti, Raziye Akbari, Carlo Antonini. Additive manufacturing by digital light processing: a review. *Progress in Additive Manufacturing* (2023) 8. P. 331–351. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00336-0>
4. Ishak Ertugrul, Osman Ulkir, Sezgin Ersoy, Minvydas Ragulskis. Additive Manufactured Strain Sensor Using Stereolithography Method with Photopolymer Material. *Polymers* 15(4). 991p. DOI: 10.3390/polym15040991
5. Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker. Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Second Edition. *Springer*. 2015. 510 p. DOI 10.1007/978-1-4939-2113-3
6. Ben Redwood, Filemon Schöffner, Brian Garret. The 3D Printing Handbook. Technologies, design and applications. *3D Hubs*. 2017. 347 p.

7. Стереолітографія (Laser Stereolithography, SLA). URL: <https://pro3d.com.ua/a367313-stereolitografiya-laser-stereolithography.html> (дата звернення: 28.05.2024).
8. Що таке DLP 3D друк. URL: <https://pro3d.com.ua/a393155-scho-take-dlp.html> (дата звернення: 28.05.2024).
9. Що таке LCD 3D-принтер та де він використовується? URL: <https://www.0332.ua/list/471643> (дата звернення: 28.05.2024).
10. Слайсери для 3d-друку. URL: <https://makerhub.org/slicers-3d-print/> (дата звернення: 28.05.2024).
11. Anycubic Photon LCD 3D принтер. URL: <https://3dreams.com.ua/ua/product/anycubic-photon-lcd-3d-принтер/> (дата звернення: 28.05.2024).
12. Регресійний аналіз. URL: [https://ukrayinska.libretxts.org/Статистика/Прикладна_статистика/Книга%3A_Статистика_бізнесу_\(OpenStax\)/13%3A_Лінійна_регресія_та_кореляція/13.04%3A_Рівняння_регресії](https://ukrayinska.libretxts.org/Статистика/Прикладна_статистика/Книга%3A_Статистика_бізнесу_(OpenStax)/13%3A_Лінійна_регресія_та_кореляція/13.04%3A_Рівняння_регресії) (дата звернення: 28.05.2024).
13. Основи кореляційного та регресійного аналізу. URL: https://pchilka-litsei.in.ua/excel-book/basis_analysis.html (дата звернення: 29.05.2024).
14. Метод регресійного аналізу в MS Excel. URL: <https://modeling.at.ua/publ/10-1-0-58> (дата звернення: 29.05.2024).
15. Нікітін Д.О., Стрілець Р.С., Близнюк Д.С. Сравнительный анализ технологий 3D прототипирования SLA, DLP и LCD. Разработка автоматизированной станции для 3D печати. VII Міжнародна науково-технічна Інтернет-конференція «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами» (НУХТ). 2020 С. 55–56. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/bitstreams/934a9612-ecc5-4a3a-8377-320f864dac10/download>
16. Igor Nevlyudov, Ievgenii Razumov-Fryziuk, Dmytro Nikitin, Danylo Blyzniuk, Roman Strelets. Cost Estimation of Photopolymer Resin for 3D Exposure of Circuit Boards. *Technology Audit and Production Reserves* № 2/2(64), 2022. P.43-49. DOI: 10.15587/2706-5448.2022.256538
17. I. Nevlyudov, E. Razumov-Fryzyuk, D. Nikitin, D. Bliznyuk, R. Strelets. Technology for creating the topology of printed circuit boards using polymer 3D masks. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості* № 1 (15). 2021 С.120–131. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.120>
18. Redwood B. 2020. 3D Printing. Practical guide. Book Workshop. 2022 [Redvud B. 2020. 3D-druk. Praktychnyi posibnyk. Knyzhkova Maisternia] 2022
19. Стереолітографія – що потрібно знати про технологію. URL: <https://www.3dprinter.ua/stereolitografiya-shho-potribno-znaty-pro-tehnologiyu/> (дата звернення: 29.05.2024).
20. Методи і техніка досліджень. URL: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/ophv_10/page3.html (дата звернення: 29.05.2024).
21. Методологія і організація наукових досліджень URL: https://shron1.chtyvo.org.ua/Burhu_Yurii/Metodolohiia_i_orhanizatsiia_naukovykh_doslidzhen.pdf (дата звернення: 29.05.2024).
22. Основи наукових досліджень. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/162019668.pdf> (дата звернення: 29.05.2024).

References

1. Technologies of photopolymer 3D printing: description, advantages, and disadvantages [Tekhnologii fotopolimernoho 3D-druku: opys, perevahy ta nedoliki]: available at: <https://monofilament.com.ua/ua/blog-novini-3d-druku-ta-additivnih-tehnologij/sla-dlp-lcd-tehnologiji-fotopolimernogo-3d-druku-opis-perevagi-ta-nedoliki> (last accessed: 28.05.2024).
2. Additive technology: prospects and challenges 3D-print [Adytyvni tekhnologii: perspektyvy i problemy 3D-druku] available at: https://nti.ukrintei.ua/wp-content/uploads/2018/05/2017-1_stat9_UA_povn.pdf (last accessed: 04.06.2024).
3. Rajat Chaudhary, Paride Fabbri, Enrico Leoni, Francesca Mazzanti, Raziye Akbari, Carlo Antonini, "Additive manufacturing by digital light processing: a review". *Progress in Additive Manufacturing* (2023) 8. P. 331–351. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00336-0>
4. Ishak Ertugrul, Osman Ulkir, Sezgin Ersoy, Minvydas Ragulskis, "Additive Manufactured Strain Sensor Using Stereolithography Method with Photopolymer Material" *Polymers* 15(4). 991p. DOI: 10.3390/polym15040991
5. Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker. *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Second Edition. Springer. 2015. 510 p. DOI: 10.1007/978-1-4939-2113-3
6. Ben Redwood, Filemon Schöffner, Brian Garret. *The 3D Printing Handbook. Technologies, design and applications*. 3D Hubs. 2017. 347 p.

7. Stereolithography (Laser Stereolithography, SLA) [Stereolitohrafiia (Laser Stereolithography, SLA)]: available at: <https://pro3d.com.ua/a367313-stereolitografiya-laser-stereolithography.html> (last accessed: 28.05.2024).
8. What is DLP 3D printing? [Shcho take DLP 3D druk]: available at: <https://pro3d.com.ua/a393155-scho-take-dlp.html> (last accessed: 28.05.2024).
9. What is an LCD 3D printer and where is it used? [Shcho take LCD 3D-принтер та де він використовується?]: available at: <https://www.0332.ua/list/471643> (last accessed: 28.05.2024).
10. Slicers for 3d printing [Slaisery dlia 3d-druku]: available at: <https://makerhub.org/slicers-3d-print/> (last accessed 28.05.2024).
11. Anycubic Photon LCD 3D printer [Anycubic Photon LCD 3D принтер]: available at: <https://3dreams.com.ua/ua/product/anycubic-photon-lcd-3d-принтер/> (last accessed: 28.05.2024).
12. Regression analysis [Rehresiinyi analiz]: available at: [https://ukrayinska.libretexts.org/Статистика/Прикладна_статистика/Книга%3A_Статистика_бізнесу_\(OpenStax\)/13%3A_Лінійна_регресія_та_кореляція/13.04%3A_Рівняння_регресії](https://ukrayinska.libretexts.org/Статистика/Прикладна_статистика/Книга%3A_Статистика_бізнесу_(OpenStax)/13%3A_Лінійна_регресія_та_кореляція/13.04%3A_Рівняння_регресії) (last accessed: 28.05.2024).
13. Basics of correlation and regression analysis [Osnovy koreliatsiinoho ta rehresiinoho analizu]: available at: https://pchilka-litsei.in.ua/excel-book/basis_analysis.html (last accessed: 29.05.2024).
14. The method of regression analysis in MS Excel [Metod rehresiinoho analizu v MS Excel]: available at: <https://modeling.at.ua/publ/10-1-0-58> (last accessed: 29.05.2024).
15. Nikitin D.O., Strilets R.E., Blyzniuk D.S. "Porivnyalnil analizy tekhnolohiyi 3D prototypyrovaniya SLA, DLP y LCD. Razrobotka avtomatyzyrovanoi stantsyy dlia 3D pechaty" VII Mizhnarodna naukovo-tekhnichna Internet-konferentsiia "Suchasni metody, informatsiine, prohramne ta tekhnichne zabezpechennia system keruvannia orhanizatsiino-tekhnichnymy ta tekhnolohichnymy kompleksamy" (NUKhT).2020 P. 55–56. available at: <https://dspace.nuft.edu.ua/bitstreams/934a9612-ecc5-4a3a-8377-320f864dac10/download>
16. Igor Nevlyudov, Ievgenii Razumov-Fryziuk, Dmytro Nikitin, Danylo Blyzniuk, Roman Strelets "Cost Estimation of Photopolymer Resin for 3D Exposure of Circuit Boards" Technology Audit and Production Reserves — № 2/2(64), 2022. P.43–49. DOI: 10.15587/2706-5448.2022.256538
17. I. Nevlyudov, E. Razumov-Fryzyuk, D. Nikitin, D. Bliznyuk, R. Strelets "Technology for creating the topology of printed circuit boards using polymer 3d masks" Suchasnyi stan naukovykh doslidzhen ta tekhnolohii v promyslovosti № 1 (15). 2021 C. 120–131. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.120>
18. Redwood B. 2020. 3D Printing. Practical guide. Book Workshop. 2022 [Redvud B. 2020. 3D-druk. Praktychnyi posibnyk. Knyzhkova Maisternia] 2022.
19. Stereolithography – what you need to know about the technology [Stereolitohrafiia – shcho potribno znaty pro tekhnolohiiu]: available at: <https://www.3dprinter.ua/stereolitografiya-shho-potribno-znaty-pro-tehnologiyu/> (last accessed: 29.05.2024).
20. Research methods and techniques [Metody i tekhnika doslidzhen]: available at: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/ophv_10/page3.html (last accessed: 29.05.2024).
21. Methodology and organization of scientific research [Metodolohiya i orhanizatsiia naukovykh doslidzhen]: available at: https://shron1.chtyvo.org.ua/Burhu_Yurii/Metodolohiia_i_orhanizatsiia_naukovykh_doslidzhen.pdf (last accessed: 29.05.2024).
22. Basics of the scientific research [Osnovy naukovykh doslidzen]: available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/162019668.pdf> (last accessed: 29.05.2024).

Надійшла 31.05.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Невлюдов Ігор Шакирович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; e-mail: igor.nevlyudov@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9837-2309>

Стрілець Роман Євгенійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант, Харків, Україна; e-mail: roman.strilets@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5123-8703>

Близнюк Данило Сергійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант, Харків, Україна; e-mail: danylo.blyzniuk@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3041-1885>

Nevliudov Igor – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radioelectronics, Head at the Department of Computer-integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

Strilets Roman – Kharkiv National University of Radioelectronics, PhD Student, Kharkiv, Ukraine.

Blyzniuk Danylo – Kharkiv National University of Radioelectronics, PhD Student, Kharkiv, Ukraine.

ENSURING QUALITY INDICATORS OF PHOTOPOLYMER 3D PRINTING BY USING MATHEMATICAL MODELING AND TEST MODELS

The subject of the research in the article is the analysis of the influence of technological parameters of photopolymer printing on the appearance of defects in the printing process. Test models for analysis are used, which contain elements that are affected by changes in technological parameters. **The purpose** of the work is to determine the dependence between the technological parameters of photopolymer printing and the defects that arise because of printing using models for testing. The article addresses the following **tasks**: analysis of existing test models and determination of model elements and the influence of technological parameters on them. The methods used for the research are mathematical analysis in the form of univariate linear regression and the empirical method. This method consists in comparing and measuring the difference between individual test samples to obtain values that will later be used in regression analysis. The following **results** were obtained: the dependence of technological factors and their influence on the elements of the test model was determined, which consists in changing the physical dimensions of the test models. With insufficient exposure time, the dimensions of the model are reduced, and defects are created. When the exposure time increases, the dimensions of the model increase linearly, defects appear in the form of holes disappearing or their sizes changing. **Conclusions**: because of an experimental study, which consists in printing test models and their analysis with the help of linear one-factor regression, the dependence between the exposure time and the physical dimensions of the model was determined and confirmed. Then a method of studying the correspondence of dimensions depending on the exposure time using test models was proposed and mathematical modeling in the form of regression univariate analysis. In the following, it is proposed to determine the influence of the layer height on the exposure time. Further, it is proposed to determine the significance of individual technological factors among themselves and their influence on the defects obtained because of printing. Building a regression analysis model, determining the correlation of technological parameters and their influence on quality indicators. Determination of the coefficient of determination of the constructed model.

Keywords: 3D printer; additive manufacturing; photopolymer printing; regression analysis; test models; mathematical analysis; research.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Невлюдов І. Ш., Стрілець Р. Є., Близнюк Д. С. Забезпечення якісних показників фотополімерного 3D-друку за допомогою математичного моделювання і тестових моделей. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 2 (28). С. 96–107. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.2.096>

Nevliudov, I., Strilets, R., Blyzniuk, D. (2024), "Ensuring quality indicators of photopolymer 3D printing by using mathematical modeling and test models", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (28), P. 96–107. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.2.096>