

SECTION 12.**AUTOMATION AND APPLIANCES MAKING****Дмитро Нікітін**

аспірант

*Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна***Ігор Балабанов**

здобувач вищої освіти

Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ ФОТОПОЛІМЕРНОЇ СМОЛИ НА ЗБЕРЕЖЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ МОДЕЛІ ПІД ЧАС 3D-ДРУКУ

Вплив температури на процес фотополімеризації смоли в 3D друкарстві є ключовим аспектом, визначаючим якість та характеристики надрукованих об'єктів. Температура в цьому процесі впливає на ряд параметрів, таких як час полімеризації, розширення матеріалу, та кінцеві механічні властивості виробу. Висока температура може прискорити процес полімеризації, зменшуючи час, необхідний для створення кожного шару. Однак занадто висока температура може також призвести до недостатньої фіксації окремих шарів та порушення форми об'єкта. З іншого боку, низька температура може вповільнити полімеризацію та забезпечити кращу точність друку, оскільки матеріал матиме більше часу для точного висихання та фіксації. Однак низька температура може також впливати на адгезію між шарами та призводити до менш стійких структур. Також, важливо враховувати вплив температури на властивості фотополімерної смоли, такі як її в'язкість та текучість, які можуть варіювати залежно від температурних умов. Усі ці фактори роблять тему впливу температури фотополімерної смоли на 3D друк цікавою та важливою для подальших досліджень та вдосконалення технології 3D друку.

За темою дослідження впливу технологічних параметрів експонування топології ДПІ за допомогою фотополімерного 3D друку, вже проводилися дослідження [1-2]. В цих дослідженнях, до модель залежності чинників які впливають на відхилення розмірів провідникової структури, були включені наступні параметри:

- час засвічення смоли (в межах від 7 с до 20 с);
- інтенсивність випромінювання максимальна (при значеннях 2800 Лм та 1600 Лм);
- довжина хвилі випромінювання (при 435 нм);
- товщина базового шару (при значеннях 20 мкм та 50 мкм).

За результатами цих досліджень була побудована модель лінійної регресійна кореляційна впливу параметрів експонування фотополімерної маски на відхилення геометричних розмірів топології. Ріння лінійної регресії наведено в формулі 1.

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 = 0,002 + 0,904x_1 + 0,134x_2 + 0,3x_3 \quad (1)$$

де Y – фактор відхилення геометричних розмірів топології ДПІ; b_0, b_1, b_2, b_3 – коефіцієнти лінійної регресії впливу параметрів на фактор; x_1, x_2, x_3 – параметри впливу на фактор (а саме: x_1 – коефіцієнт впливу часу експонування; x_2 – коефіцієнт вплив висоти шару маски; x_3 – коефіцієнт впливу інтенсивності випромінювання).

Данна модель дозволяє зрозуміти, які параметри більше впливають на фотополімерну маску та дозволяє спрогнозувати відхилення початково заданих розмірів топології ДП при експонуванні за LCD технологією фотополімерного 3D друку [3].

Метою досліджень цієї роботи буде доповнення даної моделі, ще одним параметром, який до цього не розглядався, а саме впливом температури фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів провідникового рисунку. Незалежно від обраної технології фотополімерного 3D друку можливо виділити основні чинники які впливають на відхилення геометричних розмірів моделі. Для зручності їх можливо розділити на дві групи: параметри налаштування експонування шарів моделі; фізико-хімічні властивості фотополімерної смоли. До параметрів налаштування належать вже ті значення які були розглянуті. Фізико-хімічні властивості фотополімерної смоли, обумовлені її хімічним складом, котрі впливають на характеристики моделі та збереження геометричних розмірів в процесі друку. До них відносять: коефіцієнт усадки смоли, %; довжина хвилі поляризації, нм; коефіцієнт теплопровідності, Вт/м².

Якщо більш детально переглянути принцип роботи фотополімерних технологій, то можливо побачити певну закономірність [4]. У всіх цих трьох технологіях використовується випромінювання світла, енергія якого іде не тільки на полімеризацію потрібних ділянок фотополімеру, а і на нагрів самої фотополімерної смоли, а саме на температурний коефіцієнт об'ємного розширення матеріалу (ТКОР). ТКОР матеріалу (α) визначає, як змінюється його об'єм при зміні температури. Він вимірюється в одиницях 1/°C (або 1/K) і показує, на скільки одиниць зміниться об'єм матеріалу при зміні температури на 1°C (або 1 K). Математично температурний коефіцієнт об'ємного розширення виражається наступною формулою 2.

$$\alpha = (\Delta v/v_0)/\Delta T \quad (2)$$

де α – температурний коефіцієнт об'ємного розширення, ΔV – зміна об'єму матеріалу, V_0 – початковий об'єм матеріалу, ΔT – зміна температури.

Температурний коефіцієнт об'ємного розширення може бути різним для різних матеріалів. Вплив ТКОР в процесі побудови шару моделі, є дуже суттєвим бо при перегріві смоли збільшується коефіцієнт розширення матеріалу. Це відображається на геометричні відхилення шарів моделі, так же сильно як і перезасвітлення шарів, (рис.1).

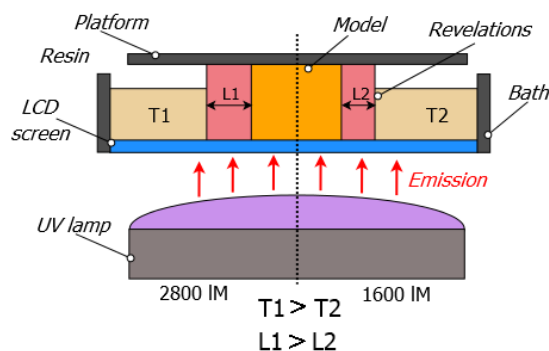


Рис. 1. Принцип впливу ТКОР в процесі експонування моделі

Таким чином дослідження температурних впливів в процесі фотополімерного 3D-друку є актуальною задачею. Виходячи з плану проведення першого етапу досліджень, було створено 28 файлів G-коду, для тестових зразків калібрувального куба (рис. 2). В кожному файлі змінювалися значення параметрів:

– час засвічення смоли: в межах від 7 с до 20 с, з кроком 1 с для кожного випробування;

- висота шару 35 мкм;
- інтенсивність випромінювання максимальна: при значеннях 2800 Лм та 1600 Лм.

Початкова температура фотополімерної смоли до друку в середньому приблизно від 20°C до 22°C. На рис. 2, наведений макет досліджень та фотополімерна смола Plexiwire Resin Basic, та надрукований тестовий зразок.

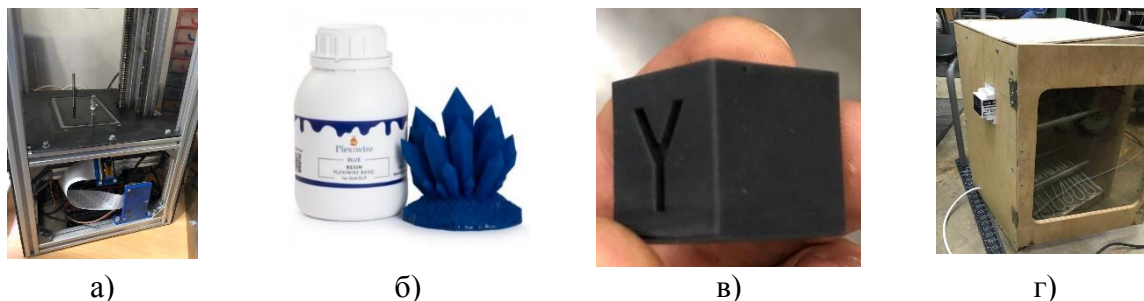


Рис.2. Інвентар для проведення досліджень

Результати вимірювань першого етапу досліджень наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати вимірювання температури

№	Час засвічення, с	Інтенсивність випромінювання, Лм	Час друку моделі	Початкова Температура смоли, °С	Температура нагріву смоли, °С	Відхилення, розмір, мм
1	7	1600	1г. 4хв. 53с	20,3	25,2	0,00862
2	8		1г. 9хв. 39с	20,6	24,7	0,01104
3	9		1г. 14хв. 25с	20,5	25,5	0,01338
4	10		1г. 19хв. 11с	21,1	25,8	0,01463
5	11		1г. 23хв. 57с	20,4	25,6	0,01673
6	12		1г. 28хв. 43с	20,9	26,1	0,01722
7	13		1г. 33хв. 29с	21,0	25,9	0,01785
8	14		1г. 38хв. 15с	21,5	26,4	0,01831
9	15		1г. 43хв. 1с	20,9	26,7	0,01843
10	16		1г. 47хв. 47с	21,3	26,7	0,01913
11	17		1г. 52хв. 33с	20,6	27,0	0,01954
12	18		1г. 57хв. 19с	20,8	27,2	0,01985
13	19		2г. 2хв. 5с	20,1	27,3	0,0185
14	20		2г. 6хв. 51с	21,2	27,1	0,02189
15	7	2800	1г. 4хв. 53с	19,8	25,8	0,00872
16	8		1г. 9хв. 39с	20,5	26,2	0,01026
17	9		1г. 14хв. 25с	21,3	26,5	0,01368
18	10		1г. 19хв. 11с	20,5	26,4	0,01452
19	11		1г. 23хв. 57с	20,4	27,2	0,01685
20	12		1г. 28хв. 43с	21,4	27,6	0,01683
21	13		1г. 33хв. 29с	20,7	27,7	0,01728
22	14		1г. 38хв. 15с	21,8	27,5	0,01775
23	15		1г. 43хв. 1с	20,7	28,2	0,01842
24	16		1г. 47хв. 47с	22,2	28,3	0,019
25	17		1г. 52хв. 33с	21,4	28,6	0,01952
26	18		1г. 57хв. 19с	21,0	28,9	0,02044
27	19		2г. 2хв. 5с	20,0	29,2	0,02208
28	20		2г. 6хв. 51с	20,7	29,4	0,02528

Враховуючи попередній етап досліджень та з метою визначення впливу температури фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів моделі, був визначений наступний діапазон значень параметрів: час засвічення смоли: від 7 с до 16 с, з кроком 1 с

для кожного випробування; висота шару: 35 мкм; максимальна інтенсивність випромінювання: 1600 Лм; температура фотополімерної смоли перед початком друку: від 10°C до 45°C, з кроком 5°C для кожного випробування.

Максимальна інтенсивність випромінювання 1600 Лм була обрана для зменшення ризику перегріву фотополімерної смоли, оскільки при даній інтенсивності середній приріст температури становив 5,4°C. Діапазон нагріву температури фотополімерної смоли від 10°C до 45°C обрали для зменшення ймовірності перегріву самої смоли та деформації плівки дна ванної. Далі, для отримання детальніших відомостей, необхідно провести серію експериментів на 80 зразках. За допомогою другого етапу експерименту буде можливо визначити, чи суттєво впливає температура фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів, чи можливо вплив визначають час експонування та інтенсивність випромінювання [5].

У табл. 2 наведені результати вимірювань відхилень геометричних розмірів при різних значеннях температури фотополімерної смоли.

Таблиця 2

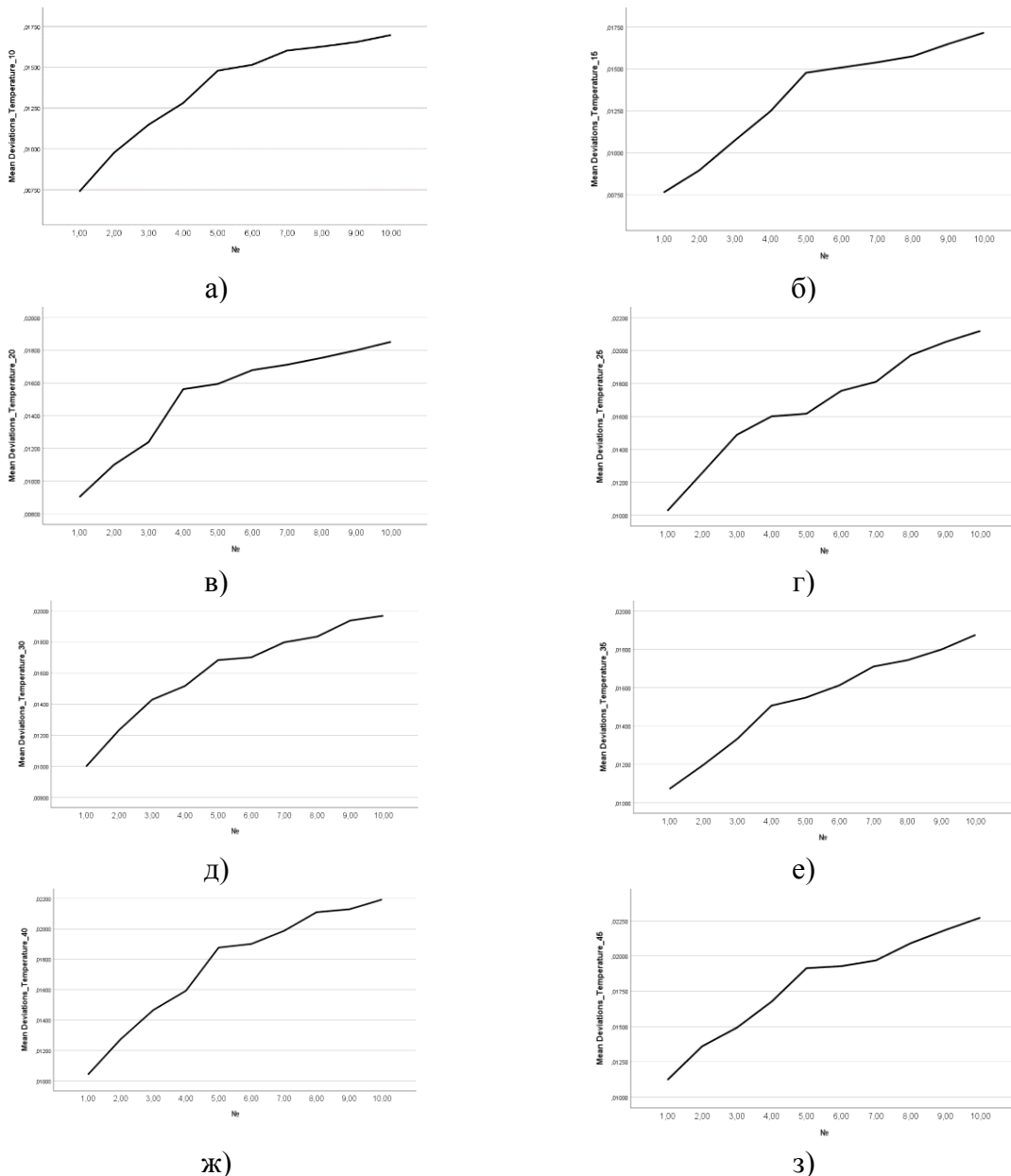
Відхилення розмірів при різних значеннях температури

№	Час засвічення, с	Температура нагріву смоли, °C	Відхилення, розмір по осях XY, мм	№	Час засвічення, с	Температура нагріву смоли, °C	Відхилення, розмір по осях XY, мм
1	7	10	0,00738	41	7	30	0,00998
2	8		0,00976	42	8		0,01233
3	9		0,01148	43	9		0,01428
4	10		0,01281	44	10		0,01517
5	11		0,01479	45	11		0,01683
6	12		0,01515	46	12		0,017
7	13		0,01602	47	13		0,01797
8	14		0,01626	48	14		0,01834
9	15		0,01654	49	15		0,01937
10	16		0,01697	50	16		0,01968
11	7	15	0,00762	51	7	35	0,01072
12	8		0,00894	52	8		0,01198
13	9		0,01073	53	9		0,01334
14	10		0,01247	54	10		0,01507
15	11		0,01477	55	11		0,01548
16	12		0,01508	56	12		0,01613
17	13		0,01539	57	13		0,01711
18	14		0,01575	58	14		0,01744
19	15		0,01649	59	15		0,018
20	16		0,01716	60	16		0,01876
21	7	20	0,00901	61	7	40	0,01041
22	8		0,01099	62	8		0,01274
23	9		0,01238	63	9		0,01466
24	10		0,01562	64	10		0,01593
25	11		0,01594	65	11		0,01877
26	12		0,01679	66	12		0,01901
27	13		0,01712	67	13		0,01987
28	14		0,01754	68	14		0,0211
29	15		0,018	69	15		0,02129
30	16		0,01852	70	16		0,02193
31	7	25	0,01026	71	7	45	0,01121
32	8		0,01257	72	8		0,0136
33	9		0,01489	73	9		0,01492
34	10		0,01601	74	10		0,01677
35	11		0,01617	75	11		0,01914
36	12		0,01756	76	12		0,01928
37	13		0,01811	77	13		0,01969

Продовження табл. 2

№	Час засвічення, с	Температура нагріву смоли, °С	Відхилення, розмір по осях ХУ, мм	№	Час засвічення, с	Температура нагріву смоли, °С	Відхилення, розмір по осях ХУ, мм
38	14		0,01972	78	14		0,02091
39	15		0,02053	79	15		0,02185
40	16		0,0212	80	16		0,02272

На підставі отриманих даних можна прийти до висновку, що зі збільшенням температури фотополімерної смоли зростає величина відхилень геометричних розмірів моделі, рис. 3.



а – відхилення розмірів при 10°C; б – відхилення розмірів при 15°C; в – відхилення розмірів при 20°C; г – відхилення розмірів при 25°C; д – відхилення розмірів при 30°C; е – відхилення розмірів при 35°C; ж – відхилення розмірів при 40°C; з – відхилення розмірів при 45°C.

Рис. 3. Графіки залежності впливу температури фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів топології ДП

Слід відзначити, що при температурах у діапазоні від 10°C до 20°C середнє відхилення розмірів є меншим, ніж у попередніх дослідах за тих самих значення часу експонування, табл. 3.

Таблиця 3

Різниця відхилень розмірів залежно від температури

№	Час експонування, с	Відхилення при температурі 10°C	Відхилення при температурі 15°C	Відхилення при температурі 20°C	Відхилення на першому етапі дослідження, мм	Середнє значення відхилень при температурах від 10°C до 20°C	Різниця у вимірюваннях відхилень по осях ХУ, мм
1	7	0,00738	0,00762	0,00901	0,00862	0,00800	0,000617
2	8	0,00976	0,00894	0,01099	0,01104	0,00989	0,001143
3	9	0,01148	0,01073	0,01238	0,01338	0,01153	0,00185
4	10	0,01281	0,01247	0,01562	0,01463	0,013633	0,000997
5	11	0,01479	0,01477	0,01594	0,01673	0,015166	0,001563
6	12	0,01515	0,01508	0,01679	0,01722	0,015673	0,001547
7	13	0,01602	0,01539	0,01712	0,01785	0,01617	0,001673
8	14	0,01626	0,01575	0,01754	0,01831	0,01651	0,001793
9	15	0,01654	0,01649	0,018	0,01843	0,01701	0,00142
10	16	0,01697	0,01716	0,01852	0,01913	0,01755	0,00158

Висновки. Проведені дослідження впливу температурного коефіцієнта об'ємного розширення (ТКОР) на відхилення геометричних розмірів провідникової структури друкованої плати, Експерименти відбувалися в два етапи:

– дослідження впливу часу експонування та інтенсивності випромінювання УФ на нагрів фотополімерної смоли (оцінка впливу часу експонування на температуру фотополімеру та аналіз впливу інтенсивності випромінювання УФ на температурні параметри фотополімерної смоли);

– дослідження впливу температури фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів (вивчення залежності відхилень геометричних розмірів від температури фотополімеру).

Згідно з результатами досліджень можна зробити наступні висновки:

а) Зі збільшенням часу експонування шару спостерігається зростання температури фотополімерної смоли, що призводить до збільшення відхилень розмірів моделі. Це може бути обумовлено тим, що із збільшенням часу експонування збільшується час друку моделі, що в свою чергу призводить до збільшення часу впливу УФ-випромінювання на фотополімерну смолу та її нагріву, а також збільшення значення температурного коефіцієнта розширення

– температури фотополімерної смоли від часу експонування;

– відхилення геометричних розмірів моделі від температури фотополімерної смоли.

б) Температура нагріву фотополімерної смоли в значній мірі залежить не лише від часу друку, але й від інтенсивності УФ-випромінювання. Це можна визначити через відмінність між початковою температурою фотополімерної смоли та температурою після друку. Зміна інтенсивності випромінювання призводить до збільшення теплового впливу на фотополімер.

в) Оцінюючи значення відхилень геометричних розмірів топології, можна прийти до висновку, що час експонування в межах від 17 секунд до 20 секунд є надто великим, оскільки вони перевищують допустимі відхилення $\pm 0,02$ мм. Це особливо відчутно при інтенсивності випромінювання 2800 Лм. Таким чином, для наступного етапу досліджень

рекомендується користуватися діапазоном часу експонування від 7 секунд до 16 секунд.

г) При збільшенні температури фотополімерної смоли збільшується значення відхилень геометричних розмірів моделі.

д) При температурах в діапазоні від 10°C до 20°C, середнє відхилення розмірів менше ніж в попередніх дослідах, при тих же значеннях часу експонування.

Всі ці залежності можливо наочно побачити в процесі виготовлення пробних фотополімерних масок топології ДП при автоматизованому контролю температури фотополімерної смоли та при без контролі температури.

Список використаних джерел:

1. Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш., Близнюк Д.С., Разумов-Фризюк Е.А., Стрілець Р.Е. Створення топології друкованих плат за допомогою фотополімерних адитивних технологій 3D друку // Науково-технічний журнал «Проблеми тертя та зношування» № 1(90) (2021) 42-54 с.
2. Nevlyudov I., Razumov-Fryziuk I., Nikitin D., Blyzniuk D., Strelets R. Technology for creating the topology of printed circuit boards using polymer 3D masks // № 1 (15) (2021): Сучасний стан наукових досліджень і технології в промисловості. ст 120-131.: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.120>.
3. 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
4. László Keviczky, Ruth Bars, Jenő Hetthéssy, Csilla Bányász «Control Engineering», In: Advanced Textbooks in Control and Signal Processing, Springer (2019). p. 545. ISBN 978-981-10-8296-2. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-8297-9>.
5. SPSS Statis for Dumlimes, 4th Edition /by Jesus Salcedo and Keith McCormick.[Book]. Published by: John&Sons.Inc. 2020. P. 444.