

Д. О. Нікітін

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

РОЗРОБКА МОДЕЛІ КЕРУВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРИ ФОТОПОЛІМЕРНОЇ СМОЛИ НА БАЗІ LCD-ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ

Анотація. У статті розглянуто вплив температури фотополімерної смоли для адитивного 3D-друку на якість готових деталей. Розроблена система контролю температури фотополімерної смоли для зменшення температурного коефіцієнту об'ємного розширення речовини під час виготовлення об'ємної моделі. Проаналізовано особливості фотополімерного 3D-друку за технологією LCD. Розглянуто процес виникнення перегріву фотополімера в процесі друку, та розглянуті чинники які впливають на нагрів фотополімерної смоли. За результатами тестів можливо зробити висновки що, контроль температури фотополімерної смоли дозволяє зменшити відхилення геометричних розмірів зменшилося на 0,013 мм.

Ключові слова: фотополімерний 3D-друк, LCD технологія, фотополімерна смола, теплові потоки, контроль температури, об'ємне розширення рідини.

Вступ

Розвиток адитивних технологій виробництва все більше стає поширеним в промисловості та повсякденному житті. Одним з най більш універсальним та доступним для споживачів засобом для отримання об'ємних деталей складних форм є 3D-друк [1].

Фотополімерний 3D-друк, являється одним з доступнішим та точним методом протипування деталей. Фотополімерний друк використовується багатьох сферах, як: ювелірне виробництво (створення майстер-моделей для лиття), стоматологі (створення протезів зубів), створення декоративних моделей для дизайну інтер'єру. Всі фотополімерні технології (SLA, DLP та LCD), працюють на принципі фотополімеризації.

Фотополімеризація – це метод, в якому використовується світло (видиме або ультрафіолетове) для створення хімічної реакції, в результаті якої рідкий матеріал – полімер, стає твердішим у результаті процесу затвердіння

Точність виготовлення деталей за цими технологіями залежить не тільки від технічних характеристик принтера, а і від властивостей фотополімерної смоли. Тому визначення впливу смол на збереження геометричних розмірів, є актуальною задачею при виготовленні моделі [2, 3].

Аналіз мережного тракту

Фотополімерному 3D друку можна ідентифікувати наступні основні фактори, що впливають на відхилення геометричних розмірів моделі. Для зручності їх можна поділити на дві групи:

- параметри налаштування експонування шарів моделі;
- фізико-хімічні властивості фотополімерної смоли.

Параметри налаштування експозиції шарів моделі, до яких відносяться значення, встановлені в програмі для підготовки моделі до друку (наприклад, NanoDLP або Chitobox). Серед них можна виділити: висота шару, мкм; кількість базових шарів; час експонування базових та основних шарів, секундах; інтенсивність випромінювання, Лм.

Характеристики моделі та збереження геометричних розмірів під час друку залежать від фізико-хімічних властивостей фотополімерної смоли, що обумовлені її хімічним складом. Серед цих властивостей можна відзначити: коефіцієнт усадки смоли, %; довжина хвилі поляризації, нм; коефіцієнт теплопровідності, Вт/м².

Детальне розглядання принципу роботи фотополімерних технологій вказує на певну системність. У всіх трьох цих технологіях використовується випромінювання світла, енергія якого не лише спрямована на полімеризацію необхідних областей фотополімеру, але також на нагрівання самої фотополімерної смоли, зокрема за рахунок температурного коефіцієнта об'ємного розширення матеріалу (ТКОР). Температурний коефіцієнт об'ємного розширення матеріалу α визначає, як змінюється його об'єм при зміні температури і вимірюється в одиницях 1/°C (або 1/K). Він показує, на скільки одиниць зміниться об'єм матеріалу при зміні температури на один градус Цельсія [4].

Математично температурний коефіцієнт об'ємного розширення.

$$\alpha = \frac{\Delta v}{v_0} / \Delta T, \quad (1)$$

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 варіюватися в залежності від конкретного матеріалу. Вплив ТКОР під час формування кожного шару моделі виявляється дуже важливим, оскільки при надто високій температурі смоли збільшується коефіцієнт розширення матеріалу.

Це може призводити до геометричних відхилень у шарах моделі, а також викликати проблеми, подібні до перезасвідчення шарів, зображених на рис. 1. Отже, можна врахувати, що всі ці параметри, до певної міри, безпосередньо впливають на температуру нагріву смоли під час друку і, отже, на ТКОР. В результаті вивчення температурних впливів у процесі фотополімерного 3D-друку визначається актуальність досліджень.

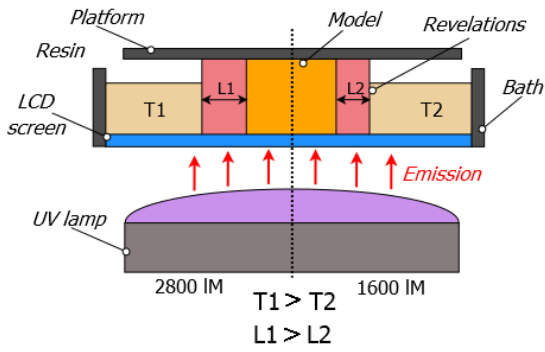


Рис. 1. Принцип впливу ТКOP в процесі експонування моделі

Фізичний опис процес нагріву фотополімерної смоли

З фізичної точки зору можна розглядати процес нагріву фотополімерної смоли та виникнення температурного коефіцієнта об'ємного розширення як проблему теплообміну у тришаровій стінці.

Розглядаючи особливості фотополімерного 3D-друку за технологією LCD, детально розглянемо структуру тришарової стінки, рис. 2. Ця стінка складається з трьох щільно прилягаючих один до одного шарів з такими товщинами: d_1 (товщина LCD екрану), d_2 (товщина плівки) та d_3 (товщина рідкої фотополімерної смоли). Кожен з цих шарів має власну теплопровідність (λ_1 , λ_2 і λ_3 відповідно).

Також відомі температури зовнішніх поверхонь t_1 і t_4 . Тепловий контакт між шарами є ідеальним, без взаємних зазорів і, відповідно, без повітряних проміжків. Температури в місцях контакту шарів позначаємо як t_2 і t_3 .

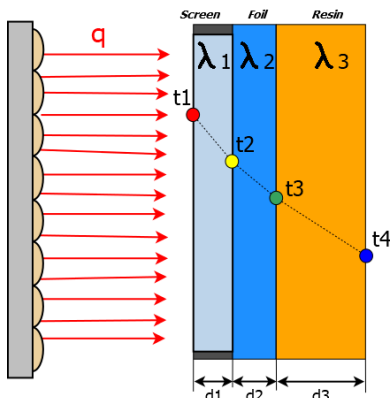


Рис. 2. Тепло-обмін в процесі фотополімерного LCD 3D-друку

Оскільки температури зовнішніх поверхонь постійні, тепловий потік – сталий, і відповідно, кількість теплоти, що проходить за одиницю часу, незмінна [5]. За стаціонарного режиму питомий тепловий потік q постійний і для всіх шарів однако-вий. Тому можна записати для кожного з шарів:

$$q = \frac{\lambda_1}{d_1}(t_1 - t_2);$$

$$q = \frac{\lambda_2}{d_2}(t_2 - t_3); \quad q = \frac{\lambda_3}{d_3}(t_3 - t_4). \quad (2)$$

З наведених виразів легко визначити значення локальних різниць температур на межах кожного шару:

$$t_1 - t_2 = q \frac{d_1}{\lambda_1}; \quad t_2 - t_3 = q \frac{d_2}{\lambda_2};$$

$$t_3 - t_4 = q \frac{d_3}{\lambda_3}. \quad (3)$$

Складаючи по черзі ліві та праві частини рівнянь отримаємо:

$$t_1 - t_4 = q \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} \right). \quad (4)$$

Звідки отримуємо рівня теплового потоку:

$$q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}} = \frac{\lambda_{ек}}{d}(t_1 - t_4). \quad (5)$$

Температури на стику шарів t_2 та t_3 можна визначити із системи рівнянь:

$$t_2 = t_1 - q \frac{d_1}{\lambda_1}; \quad t_3 = t_4 + q \frac{d_3}{\lambda_3}. \quad (6)$$

Іноді багатошарову стінку розраховують як одношарову товщиною $d_{заг}$, де $d_{заг}$ – як сума всіх товщин шару. При цьому в розрахунок вводиться еквівалентний коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{ек}$, який визначається:

$$q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}} = \frac{\lambda_{ек}}{d}(t_1 - t_4) \quad (7)$$

Звідки отримуємо рівня еквівалентний коефіцієнт теплопровідності:

$$\lambda_{ек} = \frac{d}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}}. \quad (8)$$

Під час виведення розрахункової формули для багатошарової стінки (7 та 8) припускали, що шари щільно прилягають один до одного і завдяки ідеальному тепловому контакту поверхні, які дотикаються, мають однакову температуру. При шорткій поверхні між шарами виникають повітряні зазори. А оскільки теплопровідність повітря в нормальних умовах $\lambda_{повітря}$ дорівнює $0,025 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, то наявність навіть дуже тонких повітряних прошарків різко погіршує теплопровідність конструкції.

Розробка моделі керуванням температурою фотополімерної смоли

Першим етапом для моделювання впливу теплових процесів на ТКOP фотополімерної смоли, необхідно визначити сам об'єкт керування та що саме можна вважати керуючим впливав для даної моделі.

LCD технологія. Принтер із засвіченням фотополімера світлодіодним УФ-матрицею з використанням в якості маски LCD-дисплея, рис. 3.

Рідка смола або інший світлочутливий матеріал розташовується на поверхні платформи. Після цього джерело УФ-випромінювання, використовується для висвітлення шару рідини, де матеріал стає твердим або полімеризується [3].

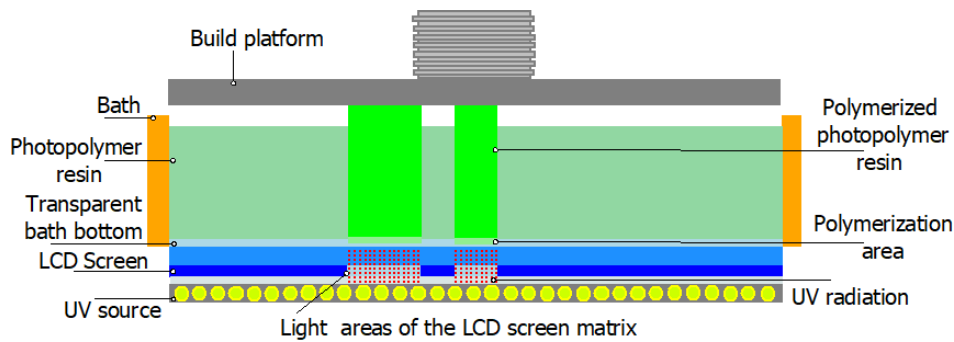


Рис. 3. Схема роботи LCD принтера

УФ матриця задається генератором імпульсів, а довжина та скаженість імпульсів задається за допомогою час засвічення та час циклу. Амплітуда імпульсу будемо вимірювати через силу світла в (кандели: $\text{кд} \times \text{ср} \times \text{Вт}^{-1}$).

Частина світла, проходячи до робочої зони, перетворюється на тепло в LCD матриці, плівці ванни і фотополімері. Відсоток (коефіцієнт) поглинання залежить від оптичної прозорості та товщини цих шарів. Коефіцієнт визначається експериментально, товщина відома. Світло, що потрапило на стіл або модель, що друкується, фокусується на ньому і бере

участь у полімеризації фотополімеру.

Вважаємо, що світло, яке залишилося, повністю витрачається на полімеризацію смоли. Коефіцієнтом відбиття від заготовки та поверхні деталі нехтуємо (поверхня заготовки матова, смола, що полімеризується, має малий коефіцієнт відбиття). Також на процес теплообміну в верстаті та нагрів ті охолодження фотополімерної смоли впливає примусова вентиляція електронних компонентів пристрою, що теж необхідно враховувати. Враховуємо взаємне нагрівання шарів. На рис. 4 наведена схема процесу передачі тепла [5].

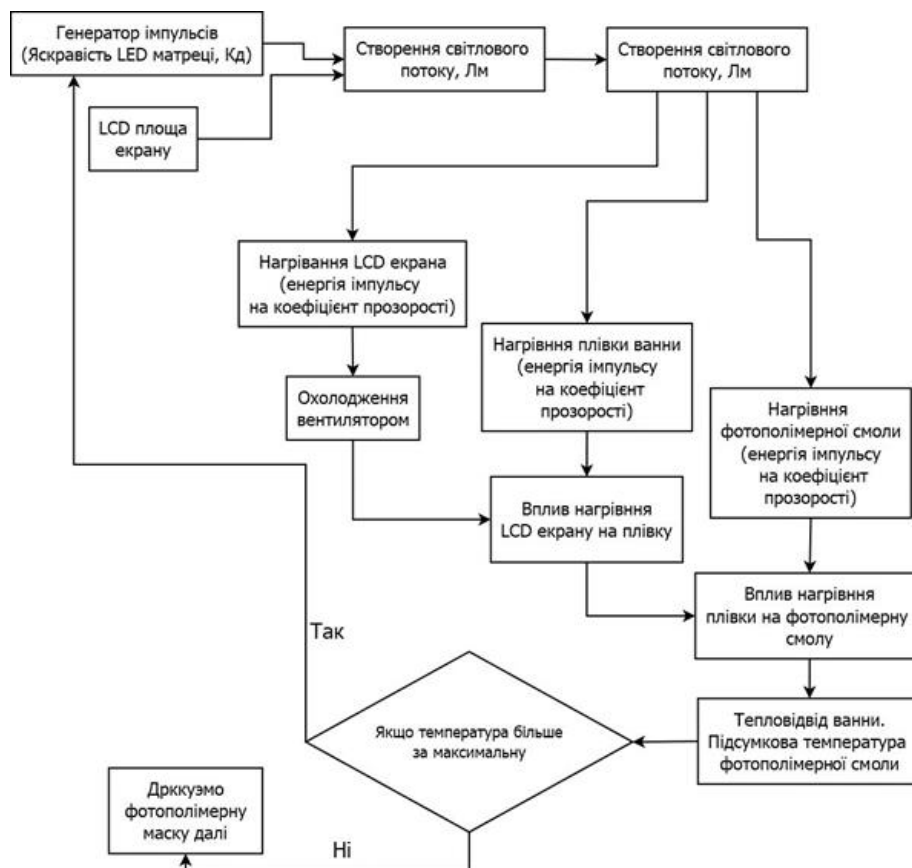


Рис. 4. Алгоритм роботи при експонуванні топології ДП

До параметрів верстату можливо віднести:
– об'єм зони корпусу верстату;
– елементи які нагріваються при експонуванні топології ДП (LCD екран, плівка та фотополімерна смола), (теплоємність та тепло супротив цих елементів).

Дані елементи можна розглянути як стінки. В даній моделі буде використовуватися розрахунок з низькою теплоємністю, оскільки товщина стінок мала. Для створення стін з низькою теплоємністю у моделі було обрано значення повного опору (імпеданс) і ємнісного опору, наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Розрахунок повного та ємкісного тепло супротиву елементів моделі

Найменування	Товщина шару, м	Теплоємність, С, кДж/м ² ×К	Тепловий супротив R, м ² ×К/Вт	Питома теплоємність Ср, кДж/кг×К	Питома маса, кг/м ²
LCD екран (скло)	0,00135	4,82	0,32	0,84	0,91
Плівка (полімерна)	0,000125	1,8	0,75	0,95	0,9
Фотополімерна смола (епоксидна смола)	0,015	0,17	0,026	1,2	1,16
Лінза УФ-матриці	0,010	4,82	0,32	0,42	0,91
Повітряний прошарок	0,025	0	0,160	0,00	0,00
Кількість діодів в УФ-матриці	24				
Площа дна ванни, мм ²	8160				
Об'єм відсіку для електроніки верстату, м ³	0,013				

З точки зору автоматизованого контролю процесу, значення ТКOP фотополімерної смоли можливо описати за допомогою рис. 5.

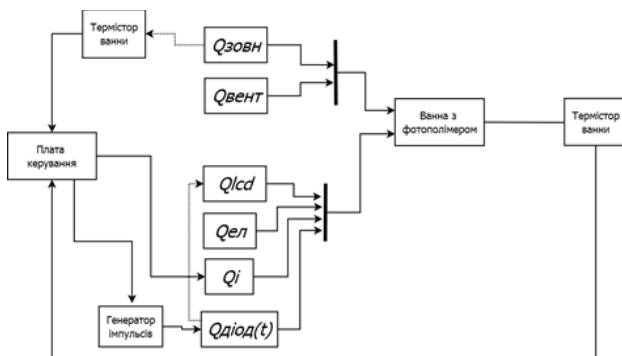


Рис. 5. Принцип роботи керуючого сигналу

Побудова математичної моделі теплових потоків, які впливають на нагрів фотополімерної смоли

В даному випадку на систему нагріву фотополімерної смоли впливає два типи теплових потоків: 1) зовнішній нагрів на макет (температура в приміщенні, природня вентиляція в приміщенні); 2) внутрішній нагрів в середні макету (нагрів від електроніки макету, нагрів від діодів УФ матриці).

Зовнішніх теплових потоків в системі є два:

– $Q_{зовн}$ – кондукційний теплообмін скрізь стінки приладу;

– $Q_{вент}$ – теплообмін від природньої вентиляції.

Математичний опис $Q_{зовн}$, можливо виразити:

$$Q_{зовн} = \frac{\Delta T}{\Sigma R_{TC}} = US(T_B - T_3). \quad (9)$$

де R_{TC} – термічний опір, К/Вт; U – загальний термічний опір, Вт/м²×К; S – площа дна ванни для фотополімерної смоли, мм²; T_3 – температура зовні верстату, °С; T_B – температура в середні верстату, °С.

Загальний термічний опір знаходимо:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \Sigma \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{h_e}} \quad (10)$$

де L – товщина шару, м; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м²×К; h_i та h_e – коефіцієнт внутрішнього і зовнішнього конвективного теплообміну відповідно, Вт/м²×К. Математичний опис $Q_{вент}$, можливо виразити як

$$Q_{вент} = \Phi \rho_n c_n (T_B - T_3). \quad (11)$$

де Φ – потік повітря в наслідок природньої вентиляції, м³/с; ρ_n – щільність повітря (1,2 кг/м³); c_n – питома теплоємність повітря (1000 кДж/кг).

Потік повітря в наслідок природньої вентиляції Φ , знаходимо за допомогою формулою 3.12.

$$\Phi = \frac{nV}{3600}. \quad (12)$$

де V – об'єм повітря в середні верстату, м³.

До внутрішніх чинників теплообміну можна віднести: Q_{LCD} – загальний внутрішній нагрів від УФ-матриці; $Q_{ел}$ – внутрішній нагрів від електронних компонентів верстату; Q_i – потік тепла внаслідок інфільтрації (примусова вентиляція); $Q_{діод}(t)$ – тепло від одного УФ-діода.

За допомогою Q_{LCD} , Q_i та $Q_{діод}(t)$, можливо контролювати ТКOP фотополімерної смоли. Основним елементом нагріву є УФ-матриця, яка генерує УФ-випромінювання. Для зниження можливості перегріву фотополімеру, вмикання діодів на УФ-матриці можливо зробити за допомогою імпульсів тим самим робити інтервали між вмиканням та вимиканням діодів. Це буде дозволяти дати час смоли охолонути та зменшити імовірність перегріву та виникнення великого значення ТКOP. Отже автоматизований контроль буде відбуватися за допомогою керуванням теплового потоку $Q_{діод}(t)$, рис. 6.

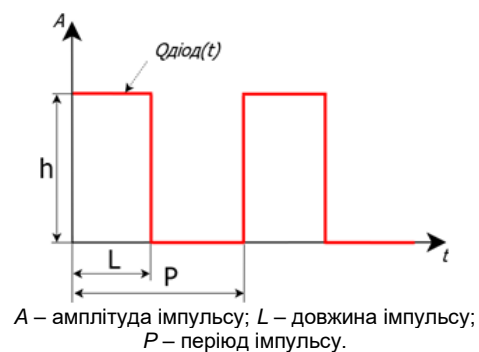


Рис. 6. Принцип роботи керуючого сигналу

Опис $Q_{діод}(t)$ можна зробити таким чином:

$$Q_{діод}(t) = q_{випром} S_{лінза} SGF. \quad (13)$$

де $q_{випром}$ – випромінювання діода, Вт/м²; $S_{лінза}$ – площа лінзи для фокусування УФ-випромінювання, мм²; SGF – коефіцієнт посилення.

Випромінювання діода $q_{випром}$ знаходимо:

$$q_{випром} = \tau (E_{пр} + E_{роз}) SGF. \quad (14)$$

де τ – передана енергія; E_{np} – пряма енергія випромінювання від діоду, Вт/м²; $E_{роз}$ – пряма енергія випромінювання від діоду, Вт/м².

Загальний внутрішній нагрів від УФ-матриці Q_{LCD} , можна виразити:

$$Q_{LCD} = H_D n_D \quad (15)$$

де H_D – норма виробітки тепла діода, Вт; n_D – кількість діодів на УФ-матриці.

Внутрішній нагрів від електронних компонентів верстата $Q_{ел}$, будемо вважати як сталу величину. Потік тепла внаслідок інфільтрації (примусова вентиляція) Q_i , знаходимо:

$$Q_i = 0,013 V_r (T_B - T_3) \quad (16)$$

де 0,013 – це об'єм нагрітого повітря в середні верстату, Дж/м³; V_r – рівень вентиляції, м³/с.

Диференціальне рівнянь, яке буде включати всі теплові потоки та пов'язувати їх вплив з температурою фотополімеру буде мати наступний вигляд:

$$m_{см} c_{см} \frac{dT}{dt} = Q_{діод}(t) + Q_{LCD} + Q_{ел} + Q_{зовн} - Q_{вент} - Q_i \quad (17)$$

де $m_{см}$ – фотополімерної смоли в ванній, кг; $c_{см}$ – питома теплоємність фотополімерної смоли.

Динамічна модель можливо виразити за допомогою елктор-тепловой аналогії. В схемі є 5 резисторів (середовища через які відбуваються втрати теплових потоків) та чотири конденсатори (середовища які поступово нагріваються в процесі експонування зображення топології) [6, 7], рис. 7.

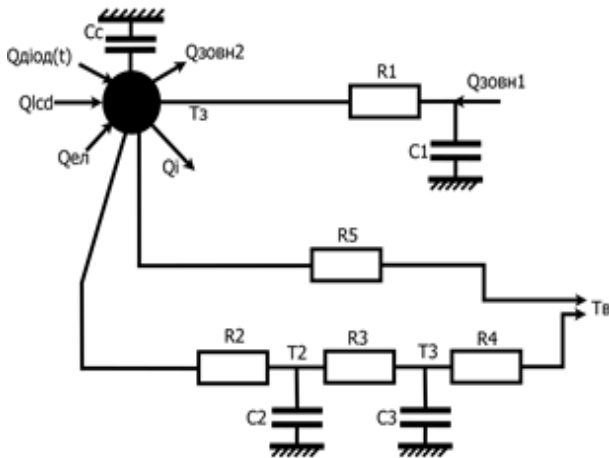


Рис. 7. Елктор-теплова схема теплообміну

За даною схемою виходить що: $Q_{зовн1}$ – приплив теплоти безпосередньо від переміщення, Вт; $Q_{зовн2}$ – приплив теплоти від корпусу верстата, Вт; $Q_{вент}$ – приплив теплоти від природної вентиляції, Вт; Q_{LCD} – приплив теплоти від загального внутрішнього нагріву від УФ-матриці, Вт; $Q_{ел}$ – приплив теплоти від електронних компонентів верстата, Вт; Q_i – приплив теплоти внаслідок інфільтрації повітря, Вт; $Q_{діод}(t)$ – приплив теплоти від одного УФ-діода, Вт; T_3 – температура зовні верстату, °C; T_B – температура в середні верстату, °C; T_2 – температура між УФ-матрицею та повітрям, °C; T_3 – температура між повітрям та LCD екраном, °C; C_c –

теплоємність фотополімерної смоли в ванній, Дж/К; C_1 – теплоємність матеріалів корпусу верстату, Дж/К; C_2 – теплоємність фіксуючої лінзи, Дж/К; C_3 – LCD-екрану, Дж/К; R_1 – опір матеріалів корпусу, К/Вт; R_2 – опір матеріалу лінзи, К/Вт; R_3 – опір повітря між лінзою та LCD-екраном, К/Вт; R_4 – опір LCD-екрану, К/Вт; R_5 – сумарний термічний опір.

Динамічний режим верстата можна змоделювати за допомогою системи звичайних лінійних диференціальних рівнянь. Ці рівняння можна переписати у вигляді матриць, а потім реалізувати динамічну модель у середовищі MatLab/Simulink. Рівняння для температурних вузлів мають такий вигляд [8]:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dT_1}{dt} &= \frac{1}{R_1} (T_3 - T_1) + q_{вирпром} S_{лінза} SGF \vartheta; \\ C_2 \frac{dT_2}{dt} &= \frac{1}{R_2} (T_3 - T_2) - \frac{1}{R_3} (T_2 - T_3); \\ C_3 \frac{dT_3}{dt} &= \frac{1}{R_3} (T_2 - T_3) - \frac{1}{R_4} (T_3 - T_4) \end{aligned} \quad (18)$$

де показник конвекції:

$$\begin{aligned} C_c \frac{dT_c}{dt} &= Q_{діод}(t) + Q_{LCD} + Q_{ел} + q_{вирпром} S_{лінза} (1 - \vartheta) + m c T_3 - \frac{1}{R_1} (T_3 - T_1) - \frac{1}{R_2} (T_3 - T_2) - \frac{1}{R_5} (T_3 - T_B). \end{aligned} \quad (19)$$

Якщо $\vartheta = 0$, то енергія випромінювання повністю передається через пікселі LCD-екрана. Якщо $\vartheta = 1$, то вся енергія випромінювання безпосередньо нагріває фотополімерну смолу.

Після перетворення рівняння мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{T}_1 &= \left(\frac{1}{R_1 C_1}\right) T_i + \left(-\frac{1}{R_1 C_1}\right) T_1 + \left(\frac{S_{лінза} SGF \vartheta}{C_1}\right) q_{вирпром}; \\ \dot{T}_2 &= \left(\frac{1}{R_2 C_2}\right) T_i + \left(-\frac{1}{R_3 C_3} - \frac{1}{R_3 C_2}\right) T_2 + \left(\frac{1}{R_3 C_2}\right) T_3; \\ \dot{T}_3 &= \left(-\frac{1}{R_3 C_3}\right) T_2 + \left(-\frac{1}{R_3 C_3} - \frac{1}{R_4 C_3}\right) T_3 + \left(\frac{1}{R_4 C_3}\right) T_B; \\ \dot{T}_B &= \left(\frac{1}{C_c}\right) Q_{діод}(t) + \left(\frac{1}{C_c}\right) Q_{LCD} + \left(\frac{1}{C_c}\right) Q_{ел} + \left(\frac{1}{C_c}\right) [q_{изл} S_{стекл} SGF (1 - \vartheta)] + \left(\frac{m c}{C_c} + \frac{1}{R_5 C_c}\right) T + \left(\frac{1}{R_1 C_c}\right) T_1 + \left(\frac{1}{R_2 C_c}\right) T_2 + \left(\frac{m c}{C_c} - \frac{1}{R_2 C_c} - \frac{1}{R_5 C_c} - \frac{1}{R_1 C_c}\right) T_B. \end{aligned} \quad (20)$$

Рівняння 19 та 20 можна подати в матричному вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu; \\ y &= Cx + Du. \end{aligned} \quad (21)$$

З такими векторами отримуємо наступну матрицю рівнянь:

$$x = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_i \end{bmatrix}; \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \\ \dot{T}_3 \\ \dot{T}_i \end{bmatrix}; \quad u = \begin{bmatrix} T_B \\ Q_{вент} \\ Q_{зовн} \\ q_{вирпром} \end{bmatrix}; \quad y = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_i \end{bmatrix};$$

$$\begin{aligned}
 C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; & D &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \\
 A &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 & 0 & \frac{1}{R_1 C_1} \\ 0 & \frac{-1}{R_1 C_1} - \frac{1}{R_3 C_2} & \frac{1}{R_3 C_2} & \frac{1}{R_2 C_2} \\ 0 & \frac{1}{R_3 C_3} & \frac{-1}{R_3 C_3} - \frac{1}{R_4 C_3} & 0 \\ \frac{1}{R_1 C_c} + \frac{1}{R_5 C_c} & \frac{1}{R_1 C_1} & 0 & \frac{\dot{m}c}{C_c} - \frac{1}{R_2 C_c} \\ & & & \frac{1}{R_5 C_c} - \frac{1}{R_1 C_c} \end{bmatrix}; \\
 B &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{S_{\text{лінза}}SGF\vartheta}{C_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{R_4 C_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\dot{m}c}{C_c} + \frac{1}{R_5 C_c} & \frac{1}{C_c} & \frac{1}{C_c} & \frac{S_{\text{лінза}}SGF\vartheta}{C_c} \end{bmatrix}. \tag{22}
 \end{aligned}$$

Дослідження теплових режимів фотополімерної смоли виконується шляхом розробки динамічної моделі в середовищі MatLab/Simulink. Реалізація моделі в середовищі Simulink наведена, на рис. 8.

Розташування елементів в конструкції LCD принтера впливає на температуру повітря всередині верстата. Для контролю температури фотополімерної смоли під час експонування зображення. В верстат буде встановлено два термістора: термістор контролю зовнішньої температури; термістор контролю температури фотополімерної смоли. Для контролю сигналів імпульсів УФ-лампи верстату буде використовуватися за допомогою PID-регулювання (пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор) [5, 6]. Отже, за допомогою PID-регулятора буде відбуватися порівняння температури фотополімерної смоли з значенням температури вказаної на контролері, кожні 1000 мс. Зазначення на контролері, вказується власноруч, або воно буде обиратися автоматично, виходячи з коливань зовнішньої температури навколо макету.

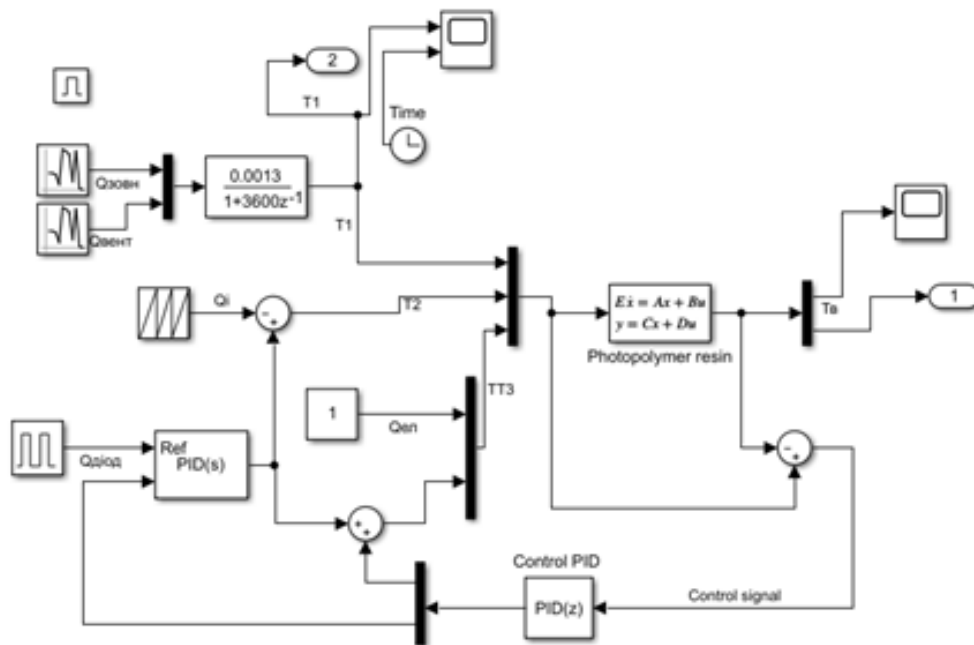


Рис. 8. Схема контролю температури фотополімерної смоли

Якщо значення температури фотополімерної смоли під час експонування зображення більше ніж значення на контролері, то PID-регулятор передає сигнал контролеру. Після цього контролер вносить корективи в G-code, та робить більший інтервал між включеннями УФ-матриці. Тим самим збільшується час на охолодження фотополімерної смоли. Після чого знову відбувається порівняння температури.

Якщо коливання тепла в фотополімерної смоли не перевищують температури вказану температури то продовжується друг, якщо більше то знову збільшується час між вмиканням та вимиканням УФ-матриці. На рис. 9 наведені результати роботи схеми контролю температури фотополімерної смоли.

Для перевірки роботи розробленої схеми контроль температури фотополімерної смоли, створено дві тестові моделі розмірами 20×20×20 мм.

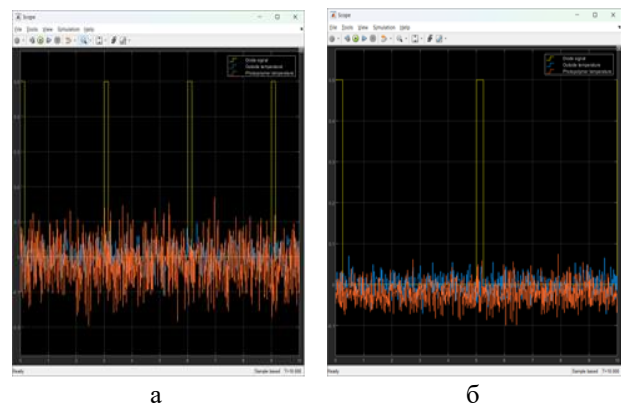


Рис. 9. Результати роботи схеми контролю температури фотополімерної смоли, температура при роботі верстата:
 а – без контролю з періодом експонування 3 с;
 б – з контролем з періодом експонування 6 с

Параметри друку наступні:

- тривалість засвічення смоли 8 секунд;
- інтенсивність випромінювання 1600 Лм;
- довжина хвилі випромінювання 435 нм;
- товщина базового шару 35 мкм.

Одна модель буде зроблена без регуляції температури інша з контролем температури фотополімерної смоли. Результати друку наведені на рис. 10.

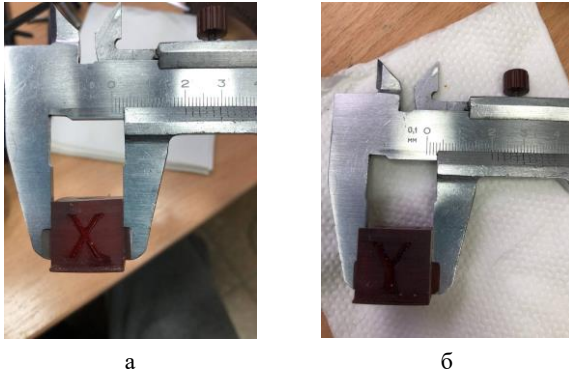


Рис. 10. Тестові зразки: а – з контролем температури фотополімерної смоли; б – без контролю температури

За результатами тестів можливо зробити висновки що, при контролі температури фотополімерної смоли, відхилення геометричних розмірів зменшилося на 0,013 мм.

Висновки

У статті розглянуто вплив температури фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів під час LCD 3D-друку. Були розглянуті наступні питання:

1. Фізичний опис процес нагріву фотополімерної смоли в процесі експонування моделі. Були розглянуті особливості фотополімерного експонування за LCD технологією, а саме процес передачі теплового потоку від УФ випромінювання діючої матриці до фотополімерної смоли. Тим саме пояснюється описується виникнення теплового коефіцієнту об'ємного розширення фотополімерної смоли під час друку моделі;

2. Розробка моделі впливу температури в Matlab Simuling. Була розроблена схема керування тепловим потоком при фотополімерному експонуванні на основі задачі теплообміну між трьома стінками з різними коефіцієнтами теплопровідності. Описані формули та побудована електрична схема нагріву за яким відбуваються процес нагріву фотополімерної смоли. Та проведення проведені симуляції в програмному середовищі Matlab Simuling.

За результатами тестів можливо зробити висновки що, контроль температури фотополімерної смоли дозволяє зменшити відхилення геометричних розмірів зменшилося на 0,013 мм.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Fiedor, P.; Pilch, M.; Szymaszek, P.; Chachaj-Brekiesz, A.; Galek, M.; Ortyl, J. Photochemical Study of a New Bimolecular Photoinitiating System for Vat Photopolymerization 3D Printing Techniques under Visible Light. *Catalysts* 2020, 10, 284.
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 технологій в промисловості. ст 120-131. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.120>.
3. Нікітін Д.О., Стрілець Р.Є., Близнюк Д.С. Порівняльний аналіз технологій 3D прототипування SLA, DLP та LCD. Розробка автоматизованої станції для 3D друку // Матеріали VII Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 26 листопада 2020. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2020. 55 – 56 с.
4. Теорія автоматичного управління: Навчальний посібник [Електр. ресурс]: уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с.
5. Vsevolod M, Kuntsevich, Vyacheslav F. Gubarev, Yuriy P. Kondratenko, Dmitriy V. Lebedev, Vitaliy P. Lysenko. *Control Systems: Theory and Applications*. CRC Press 2022, p. 327. ISBN 978-87-7022-024-8
6. Конспект лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного управління» для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр» зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології денної форми навчання [Електронний ресурс] / [Упорядник Я. В. Корпась]; Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси: ЧДТУ, 2019. – 124 с.
7. Методи сучасної теорії управління: підручник / А.П. Ладанюк, Н.М. Луцька, В.Д. Кишенько, Л.О. Власенко, В.В. Івашук – Київ : Видавництво Ліра-К, 2018. – 368 с. ISBN 978-617-7605-36-1
8. Brian H. Hahn, Daniel T. Valentine. “Essential MATLAB for Engineers and Scientists”, Academic Press. ISBN: 978-0-08-100877-5, <https://doi.org/10.1016/C2015-0-02182-7>. (2017).

Received (Надійшла) 23.11.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.01.2024

Development of a model for controlling the temperature of photopolymer resin based on LCD 3D printing technology

Dmytro Nikitin

Abstract. The article considers the influence of the temperature of photopolymer resin for adhesive 3D printing on the quality of finished parts. A system for controlling the temperature of photopolymer resin has been developed to change the temperature coefficient of volume expansion of a substance during the manufacture of a three-dimensional model. The features of photopolymer 3D printing using LCD technology are analysed. The process of photopolymer overheating in the printing process is considered, and the factors that affect the heating of photopolymer resin are discussed. According to the results of the tests, it is possible to draw conclusions that the control of the temperature of the photopolymer resin allows to reduce the deviation of the geometric dimensions by 0.013 mm.

Keywords: photopolymer 3D printing, LCD technology, photopolymer resin, thermal currents, temperature control, liquid volume expansion.