

УДК 621.3.095.2

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

*Ключко О. В., Безкоровайний В. В.*

*Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків*

Сучасні виробничі комп'ютерно-інтегровані технології (КІТ) поєднують САД (комп'ютерне проектування), САМ (комп'ютерне виробництво), САЕ (комп'ютерний інженерний аналіз) і САС (автоматизоване складання) продукції. Поєднання всіх складових КІТ дозволяє створити єдиний інформаційний простір, де можна відстежувати кожен етап виробництва, забезпечуючи прозорість, прогнозованість та надійність роботи. Однією з нових сфер застосування таких технологій є адитивне виробництво на основі 3D-друку. Воно дозволяє вже на етапі проектування оптимізувати модель, достатньо точно визначати структуру та властивості виробу, а також протестувати його ще до початку виробництва. САМ-системи надають можливість програмувати принтери для максимально ефективного друку, регулюючи параметри процесу, щоб забезпечити точність, повторюваність та відповідність проекту. Важливе значення в технологіях 3D-друку має автоматизація контролю якості виробів. Використовуючи системи зворотного зв'язку та моніторингу можна в реальному часі виявляти й коригувати відхилення у процесі 3D-друку, уникати дефектів і знижувати рівень відходів. Автоматизовані системи дозволяють швидко та точно адаптувати виробничі процеси до індивідуальних потреб, що підходить для масової кастомізації та серійного виробництва з індивідуальними налаштуваннями [1-3].

У процесі оптимізації вектора параметрів технології 3D-друку  $\alpha$  враховується множина параметрів якості виробів (деталей): роздільна здатність (Resolution)  $k_1(\alpha) \rightarrow \min$  (визначається розміром шару, який може бути надрукований); точність (Accuracy)  $k_2(\alpha) \rightarrow \min$  (міра того, наскільки точно друкована деталь відповідає оригінальній моделі); шорсткість поверхні

(Surface Roughness)  $k_3(\alpha) \rightarrow \min$  (міра нерівності поверхні деталі); міцність та витривалість (Strength and Durability)  $k_4(\alpha) \rightarrow \max$  (наскільки добре друкована деталь витримує навантаження та довготривале використання); деталізація (Detailing)  $k_5(\alpha) \rightarrow \min$  (відображає можливість відтворення деталей з високою точністю і збереженням найменших деталей і текстур); економічність (Economy)  $k_6(\alpha) \rightarrow \min$  (витрати на виготовлення деталі) тощо.

Для досягнення високої якості деталей, важливо правильно налаштувати параметри друку  $\alpha$ , вибрати відповідний матеріал, використовувати якісну модель та забезпечувати належний догляд за друкарським пристроєм. При цьому, на практиці задаються обмеження на параметри якості виробу  $k_l(\alpha) \leq k_l^*$  чи  $k_l(\alpha) \geq k_l^*$  (де  $k_l^*$  – задане граничне значення параметра  $l$ ) та намагаються знайти їх найкращу компромісну комбінацію [4-5]:

$$P(\alpha) = \sum_{l=1}^m \lambda_l \bar{k}_l(\alpha) \rightarrow \max_{\alpha}, \quad (1)$$

де  $P(\alpha)$  – узагальнена оцінка якості виробу;  $m$  – кількість параметрів, обраних для оцінки виробу;  $\lambda_l$  – ваговий коефіцієнт  $l$ -го параметра виробу,

$\lambda_l \geq 0$ ,  $l = \overline{1, m}$ ,  $\sum_{l=1}^m \lambda_l = 1$ ;  $\bar{k}_l(\alpha)$  – нормоване значення або значення функції

корисності  $l$ -го параметра.

Для визначення залежностей між вхідними параметрами 3D-технології  $\alpha$  і характеристиками виробів  $k_l(\alpha)$  необхідно провести серію експериментальних досліджень. Дослідження передбачають зміну наборів вхідних параметрів  $\alpha$ , збір інформації про отримані характеристики виробів  $k_l(\alpha)$  та аналіз отриманих результатів.

У процесі проведення досліджень було обрано деталь типу шестигранник (рис. 1). 3D-моделювання деталі було виконано у середовищі SolidWorks, а результати для подальшої обробки слайсером збережено у форматі .stl.

Усього було проведено 8 експериментів (створено 8 зразків деталі) з різними налаштуваннями слайсера (табл. 1). При цьому змінювалися такі вхідні параметри: товщина перекриття  $\delta_1$  (варіювалася від 0.5 мм до 3 мм); товщина бокової поверхні  $\delta_2$  (варіювалася від 0.5 мм до 5 мм); швидкість друку  $V$  (варіювалася від 30 мм/с до 60 мм/с) (табл. 2).

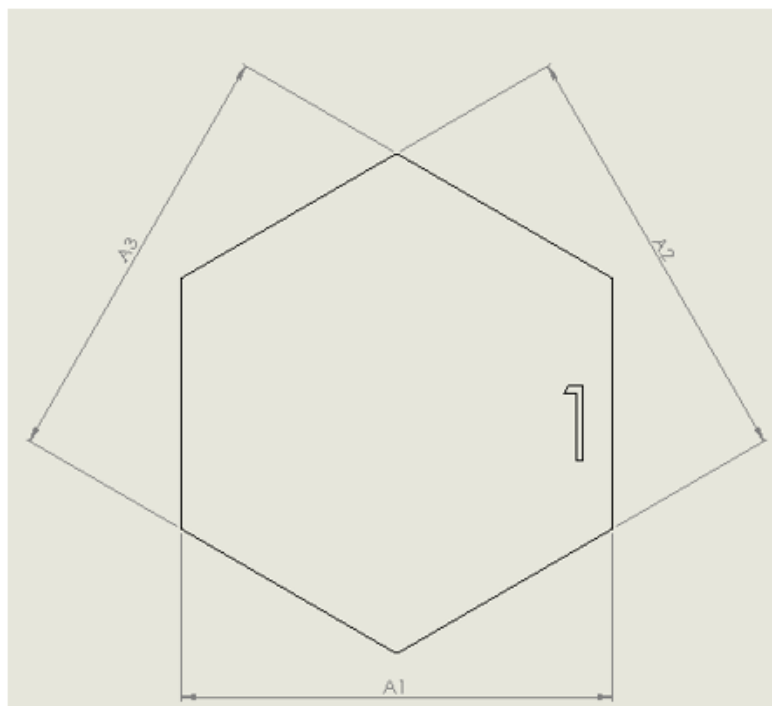


Рисунок 1 – Ескіз досліджуваної деталі-шестигранника

Таблиця 1 – Запропонований варіант плану експерименту

№	Кодові значення коефіцієнтів при невідомих							
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1, x_2$	$x_1, x_3$	$x_2, x_3$	$x_1, x_2, x_3$
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
2	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1
3	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
6	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1
7	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1	1

Таблиця 2 – Значення параметрів деталі

Параметр	Номер досліду (зразка)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$\delta_1$ , мм	0.5	3	0.5	3	0.5	3	0.5	3
$\delta_2$ , мм	0.5	0.5	5	5	0.5	0.5	5	5
$V$ , мм/с	30	30	30	30	60	60	60	60

Для спрощення розрахунків і аналізу плану експерименту вхідні величини представлені у кодованій шкалі. Результати вимірювань подано в табл. 3 (де  $R_a$  – середнє арифметичне відхилення профілю).

Таблиця 3 – Результати експериментів

Вихідний параметр	Номер досліду (зразка)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$R_a$ , мкм	6,20	22,11	9,81	9,00	4,30	2,76	4,93	6,21
$A_1$ , мм	20,45	20,45	20,41	20,45	20,45	20,46	20,06	20,41
$A_2$ , мм	20,37	20,32	20,32	20,38	20,26	20,28	20,47	20,35
$A_3$ , мм	20,08	20,16	20,04	20,00	20,02	20,01	20,11	20,00

За даними табл. 3 отримано залежності в кодованій шкалі для вимірювання змінних:

$$R_a = 8.17 + 1.85x_1 - 0.68x_2 - 3.61x_3 - 1.74x_1x_2 + 1.7x_2x_3 - 1.92x_1x_3;$$

$$A_1 = 20.39 + 0.05x_1 - 0.06x_2 - 0.05x_3 + 0.05x_1x_2 - 0.05x_1x_3 + 0.04x_2x_3;$$

$$A_2 = 20.34 - 0.01x_1 + 0.04x_2 - 0.003x_3 - 0.003x_1x_2 + 0.03x_1x_3 - 0.01x_2x_3;$$

$$A_3 = 20.05 - 0.01x_1 - 0.01x_2 - 0.02x_3 - 0.003x_1x_2 + 0.03x_1x_3 - 0.02x_2x_3.$$

Подамо оцінки впливу швидкості 3D-друку на точність отриманого розміру деталі в натуральній шкалі виміру:

$$A_1 = 20.6 + 0.105\delta_1 - 0.0089\delta_2 - 0.00299V + 0.0178\delta_1\delta_2 - 0.00213\delta_1V - 0.0148\delta_2V;$$

$$A_2 = 20.4 - 0.0197\delta_1 - 0.0199\delta_2 - 0.0018V + 0.0013\delta_1\delta_2 - 0.00053\delta_1V + 0.00089\delta_2V;$$

$$A_3 = 20.01 - 0.0693\delta_1 - 0.0258\delta_2 - 0.02V + 0.0107\delta_1\delta_2 - 0.00107\delta_1V + 0.00089\delta_2V.$$

Аналогічним способом було отримано співвідношення для оцінки впливу режимів 3D-друку на шорсткість поверхонь деталей.

Проведені експериментальні дослідження дозволили встановити зв'язок між режимами 3D-друку і геометричними параметрами отриманих деталей. Виявлено, що вхідні параметри, такі як швидкість друку, товщина перекриття та бокової поверхні, мають суттєвий вплив на якість та точність виготовлених деталей. За результатами проведених досліджень були визначені оптимальні значення цих параметрів.

### **Література:**

1. Jevtić, I., Mladenović, G., Milošević, M., Trajković, I., Travica, M., Milovanović, A., & Stojmanovski, V. (2021). Additive technology design for 3D printing and application to fast product development. In International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies" CNN TECH 2021"-Book of Abstracts (pp. 57-57).
2. Nevlyudov, I., Nikitin, D., Bliznyuk, D., Gurin, D., Razumov-Frizyuk, E., Sagittarius, E. (2020). Production of printed circuit boards using 3D printing technologies. Collection of scientific works of the National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov, 4 (482).
3. Грицюк В. Ю., Невлюдов І. Ш., Цимбал О. М. (2022). Удосконалення конструкції вузла екструдера мобільної робототехнічної платформи для 3D-друку великомасштабних структур. Вісник східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля, (5 (275)), 28-34.
4. Beskorovainyi V., "Combined method of ranking options in project decision support systems", Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries, no 4 (14), pp.13-20, 2020.
5. V. Bezkorovainyi, L. Kolesnyk, V. Gopejenko and Kosenko V., "The method of ranking effective project solutions in conditions of incomplete certainty", Advanced Information Systems, v. 8, no 2, pp. 27–38.