

# Залежність точності розмірів деталей від внутрішньої структури шарів при 3D- друці за технологією Fused Filament Fabrication

П. В. Міщенко<sup>1</sup> • Ю. В. Лашина<sup>1</sup> • В. К. Фролов<sup>1</sup> • С. М. Лапач<sup>1</sup>

Received: 11 September 2024 / Revised: 15 December 2024 / Accepted: 17 February 2025

**Анотація.** Представлені результати дослідження точності отримуваних розмірів при виготовленні зразків з композиційного матеріалу ABS pro CCF за технологією Fused Filament Fabrication в залежності від внутрішньої структури шарів. Точність оцінювалась як відхилення фактичного отриманого розміру від номінального розміру зразка у відсотках в залежності від таких факторів: шаблон заповнення, щільність заповнення та номінальне значення розміру. Досліди проводились за методикою повного факторного експерименту. Регресійні моделі побудовані за допомогою програмного забезпечення ПРІАМ. Аналіз отриманої моделі, зокрема, графіків маргінальних рівнянь регресії та маргінальних поверхонь відгуку, показав, що структура внутрішнього заповнення може по-різному впливати на точність отримуваних розмірів: так, для більшого розміру (150 мм) найкращий результат отримано при використанні шаблону заповнення “Сітка”. Для меншого розміру (10 мм) при різних варіантах щільності заповнення різні шаблони показали різний результат: для щільності 80% кращим виявився шаблон заповнення “Динамічний куб”; для щільності 60% – “Сітка”. При використанні шаблону заповнення “Сітка” при збільшенні щільності заповнення від 60% до 100% функція відгуку веде себе протилежним чином для меншого і більшого розміру: для розміру 10 мм функція відгуку віддається від оптимального значення  $\hat{y} = 0$ , а для розміру 150 мм функція відгуку навпаки, наближається до оптимального значення  $\hat{y} = 0$ . Пояснення даного явища потребує додаткових досліджень, зокрема з більшою кількістю рівнів варіювання вимірювального розміру, а також врахування розташування вимірюваного розміру відносно системи координат принтера під час побудови деталі.

**Ключові слова:** 3D друк, адитивні технології, композиційні матеріали, Fused Filament Fabrication, регресійний аналіз.

## Вступ

Протягом останніх трьох десятиліть адитивні технології успішно розвинулись від технологій швидкого прототипування до виробничих технологій, які широко застосовуються для виготовлення продуктів в різних галузях промисловості [1]. Особливо ефективними ці технології є для вирішення задач створення виробів високої геометричної складності, з високим ступенем кастомізації в умовах одиничного та малосерійного виробництва. В межах даної роботи розглядається технологія FFF (англ. – Fused Filament Fabrication), яка відноситься до категорії “екструзія матеріалу” (англ. –

material extrusion) відповідно до стандарту ISO/ASTM 52900:2021 [2].

Важливим питанням при використанні нових технологій і матеріалів є налагодження параметрів процесу таким чином, щоб задовольнити вимоги, які висуваються до виробу, з найбільшою ефективністю, тобто з найменшими витратами ресурсів – часу, матеріалу, енергії. Однією з таких вимог є забезпечення геометричної точності розмірів деталей та взаємного розташування поверхонь. На сьогоднішній день проведено чимало досліджень, спрямованих на виявлення ключових факторів процесу FFF, які впливають на точність розмірів деталей, а також на оптимізацію параметрів 3D- друку. Так, в роботі [3] досліджувався вплив температури екструзії, товщини шару, шаблону та щільності заповнення на точність геометричних розмірів зразків, виготовлених з матеріалу PLA. Авторами було з’ясовано, що нижча температура екструзії, менша висота шару, менший відсоток заповнення та шестикутний

✉ Ю. В. Лашина  
y.lashyna@gmail.com

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

шаблон заповнення в цілому призводять до підвищення точності розмірів. Автором дослідження [4] було виявлено, що різні фактори впливають на точність розмірів в залежності від розташування зразка відносно осей принтера. Так, на ширину більшою мірою впливав шаблон заповнення, для довжини домінуючим фактором була товщина шару, на товщину деталі найбільшою мірою вплинула площа друку. В роботі [5] технологія *FDM* використовувалась для виготовлення деталей з матеріалу *ABSP 400*, автори досліджували вплив товщини шару, орієнтації деталі, ширини доріжки і кута растру, а також повітряного зазору (виміряна поперечна відстань між центральними точками нанесених сусідніх доріжок філаменту) на точність розмірів деталей, а також виконували оптимізацію цих параметрів. Були отримані наступні результати – оптимальні налаштування параметрів процесу *FDM* з точки зору мінімізації відхилень розмірів деталі від номінальної моделі: товщина шару 0.178 мм, орієнтація розміру  $0^\circ$ , кут растру  $0^\circ$ , ширина растру 0.4564 мм і повітряний зазор 0.008 мм. Найбільший вплив на розміри мала орієнтація деталі в зоні її побудови.

В роботі [6] проведено ґрунтовний аналіз публікацій, присвячених дослідженню питання залежності точності розмірів деталей від параметрів процесу *FFF*, і виокремлено декілька параметрів, які впливають на точність розмірів. *Висота шару*. Як правило, чим менше висота шару, тим ближче результат до номінальної геометрії моделі в напрямку побудови через підвищення точності апроксимації. Однак не було продемонстровано, що зменшення висоти шару неодмінно призводить до підвищення точності розмірів [6]. У деяких дослідженнях рекомендується підбирати параметри так, щоб висота деталі була кратною висоті шару з метою забезпечення мінімального відхилення розмірів по осі *Z*. Загальною рекомендацією є твердження, що висота шару не повинна перевищувати 80% від діаметра сопла для забезпечення адгезії між шарами. *Об'ємна швидкість філаменту*. На цей фактор впливають: висота шару, регулювання потоку, швидкість друку та діаметр сопла. Відзначалось, що більша об'ємна швидкість філаменту призводить до нанесення надлишкового матеріалу в кутах  $90^\circ$  при високих швидкостях друкуючої головки через прискорення та уповільнення в результаті зміни напрямку руху. Крім того, температура екструдера має значний вплив на в'язкість матеріалу, спричиняючи надмірну або недостатню екструзію. *Орієнтація розміру деталі в зоні побудови*. Цей параметр має значний вплив на точність розмірів і значною мірою він залежить від геометрії досліджуваного зразка та анізотропних ефектів, що виникають в результаті процесу побудови [5]. Відмічалось, що точність розмірів значно покращується, якщо тестовий зразок друкується паралельно осі *X* або паралельно осі *Y*. Крім того, в залежності від приводів, які використовуються, точність розмірів по осям відрізняється: так, для приводу осі *Z* як правило використовуються більш

точні ходові гвинти, а для приводів *X* і *Y* – менш точні пасові передачі [7].

Як правило, структура заповнення (шаблон і щільність) деталі при використанні технології *FFF* обирається з наступних міркувань: забезпечення заданої міцності при мінімальних витратах матеріалу і часу. Питання залежності точності розмірів деталей від щільності заповнення і шаблону заповнення при адитивному виготовленні за технологією *FFF* є недостатньо вивченим, і, наскільки відомо авторам, такі дослідження не проводились для композиційного матеріалу *ABS pro CCF* (ударомодифікованого *ABS* пластику, армованого високомодульними вуглецевими волокнами).

### Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є визначення впливу геометричних параметрів внутрішнього заповнення деталі при *3D*- друці, а саме щільності і шаблону, на точність геометричних розмірів зразка, а також визначення зв'язків та взаємодій між ними. Це дасть можливість надати рекомендації щодо вибору цих двох параметрів з метою забезпечення точності розмірів при виготовленні за технологією *FFF*.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі: скласти план експерименту, виконати досліди відповідно до плану, побудувати математичну модель залежності точності геометричних розмірів деталі від параметрів внутрішнього заповнення при *3D*- друці, виконати аналіз отриманої моделі, надати рекомендації щодо вибору параметрів процесу.

### Обладнання, матеріали та методи дослідження

*Обладнання та інструменти*. Для проведення дослідження використано *FFF*- принтер *CreatBot F430*. Вимірювання розмірів зразків виконувалось штангенциркулем *Mitutoyo CD-20PPX* з точністю вимірювання 0.01мм.

*Матеріали*. Зразки виготовлені з матеріалу *ABS pro CCF*. Це композиційний матеріал, армований високомодульними вуглецевими волокнами на основі модифікованого *ABS* пластику. Вироби з цього матеріалу мають одночасно високу ударну міцність та жорсткість. За інформацією виробника, наявність функціонального наповнювача дозволяє знизити термічну усадку [8].

*Методи дослідження*. Для проведення експерименту була розроблена тривимірна модель зразка згідно *ISO 527* тип 1, ескіз якого наведено на рис. 1. Керуючі програми для виготовлення зразків були підготовлені в програмному забезпеченні *UltiMaker Cura* [9]. Основні параметри, при яких друкувались зразки,

наведені в табл. 1. При друці всі зразки були зорієнтовані однаково на столі 3D-принтера (рис. 2).

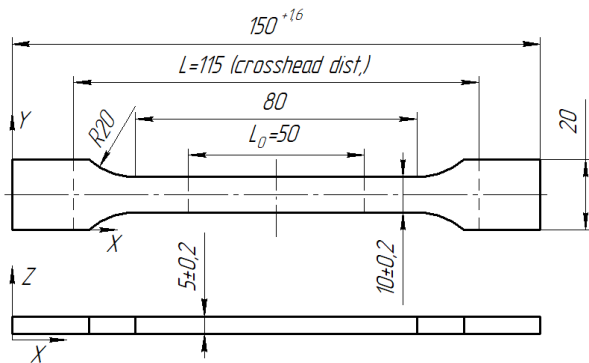


Рис. 1. Ескіз зразка

З метою отримання емпіричних математичних моделей використано методи регресійного аналізу та планування експерименту. В поданому дослідженні для отримання багатофакторної статистичної моделі було використано план повного факторного експерименту, який передбачає варіювання двох факторів на трьох рівнях та одного фактору на двох рівнях, тобто всього 18 дослідів, кожен дослід повторювався тричі.

Дослідження перехідних процесів при підйомі вантажів кранами мостового типу та пошук шляхів зниження втрат енергії ґрунтуються на розрахункових та експериментальних методах визначення динамічних та енергетичних параметрів кранових електроприводів. Для їх виконання необхідно використовувати методику розрахунку, що містить математичні моделі, які найбільш повно враховують усі основні фактори електромеханічної системи “електропривод – металоконструкція – вантаж”. Проведені дослідження [1]–[6] показали, що проблема зниження втрат енергії у вантажопідйомних кранах повинна вирішуватися разом із завданням зниження динамічних навантажень та підвищення продуктивності кранів, оскільки покращення одних показників призводить до погіршення інших.

Таблиця 1. Основні параметри 3D-друку

Режими друку		Геометричні параметри друку	
Температура друку, °C	215	Висота шару, мм	0.2
Температура стола, °C	80	Товщина верхнього суцільного шару, мм	0.6
Швидкість друку, мм/с.	40	Товщина нижнього суцільного шару, мм	0.6
Охолодження, %	0	Товщина стінки, мм	1.2

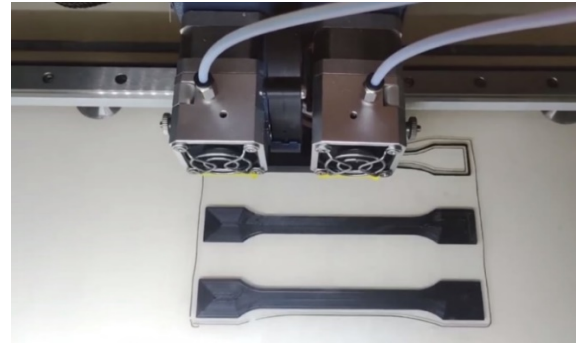


Рис. 2. Розташування зразків в зоні побудови 3D-принтера

Досліджувалось відхилення фактично отриманого розміру зразка від номіналу у відсотках в залежності від наступних факторів:

$X_1$  – щільність внутрішнього заповнення, рівні варіювання: 100 (100%), 80 (80%), 60 (60%);

$X_2$  – шаблон внутрішнього заповнення (рис. 3), рівні варіювання: 0 (гіроїд), 1 (сітка), 2 (динамічний куб);

$X_3$  – вимірюваний розмір зразка, рівні варіювання: 10 мм, 150 мм.

Зауважимо, що було прийнято рішення аналізувати відхилення у відсотках, оскільки номінали досліджуваних розмірів суттєво відрізняються один від одного. Статистичне оброблення результатів експерименту та побудова моделей виконана з використанням програмного забезпечення ПРІАМ [10].

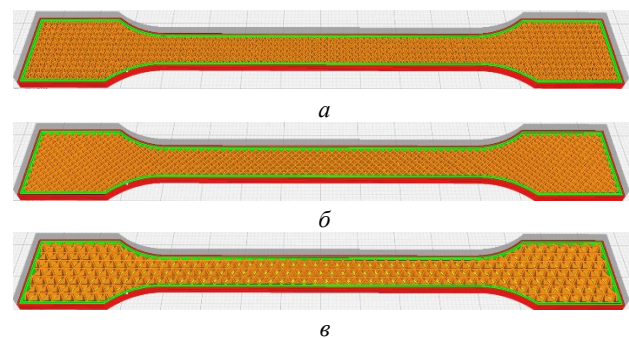


Рис. 3. Шаблиони заповнення в програмному забезпеченні *UltiMaker Cura* при щільності заповнення 60%: а – гіроїд; б – сітка; в – динамічний куб

## Результати дослідження

Узагальнена робоча матриця експерименту, яка включає значення рівнів факторів та результати дослідів, наведена у табл. 2. Зауважимо, що первинні результати вимірювання розмірів зразків наведені в табл. 3, а в табл. 2 наведені результати проміжних перетворень, а

Таблиця 2. Узагальнена робоча матриця експерименту

Теоретичні значення рівнів варіювання факторів		Фактори			Функція		
		Щільність заповнення	Шаблон заповнення	Вимірюваний розмір	Відхилення, % від номіналу		
		Формалізоване позначення факторів та натуральні значення їх рівнів			Формалізоване позначення функції		
F1...F2	F3	X1	X2	X3	у		
0	0	100	0	150	Значення результатів дослідів		
1	1	80	1	10			
2	–	60	2	–			
Дослід 1		100.00	0	150	0.287	0.411	0.391
2		100.00	1	150	0.218	0.084	0.171
3		100.00	2	150	0.338	0.320	0.347
4		80.00	0	150	0.293	0.276	0.396
5		80.00	1	150	0.249	0.224	0.176
6		80.00	2	150	0.329	0.267	0.309
7		60.00	0	150	0.362	0.144	0.384
8		60.00	1	150	0.238	0.331	0.273
9		60.00	2	150	0.316	0.307	0.171
10		100.00	0	10	–0.533	1.067	–0.633
11		100.00	1	10	–3.667	–3.670	–4.000
12		100.00	2	10	–1.700	–1.400	–1.533
13		80.00	0	10	–2.067	–3.500	–1.067
14		80.00	1	10	–2.300	–2.767	–2.500
15		80.00	2	10	–1.667	–1.633	–1.367
16		60.00	0	10	–1.200	–1.133	–1.033
17		60.00	1	10	–0.633	–0.367	–0.900
18		60.00	2	10	–1.033	–0.700	–1.233

Таблиця 3. Вихідні дані вимірів відповідно до проведених дослідів

N до-слі-ду	Зразок 1					Зразок 2					Зразок 3				
	Результати вимірювань, мм			Середнє значення, мм	Відхилення від номіналу, мм	Результати вимірювань, мм			Середнє значення, мм	Відхилення від номіналу, мм	Результати вимірювань, мм			Середнє значення, мм	Відхилення від номіналу, мм
	1	2	3			1	2	3			1	2	3		
Розмір 150 мм															
1	149.37	149.73	149.61	149.57	0.43	149.27	149.40	149.48	149.38	0.62	149.35	149.47	149.42	149.41	0.59
2	149.48	149.81	149.73	149.67	0.33	149.75	149.97	149.90	149.87	0.13	149.84	149.69	149.7	149.74	0.26
3	149.46	149.50	149.52	149.49	0.51	149.52	149.44	149.60	149.52	0.48	149.39	149.50	149.55	149.48	0.52
4	149.67	149.37	149.64	149.56	0.44	149.46	149.65	149.65	149.59	0.41	149.28	149.53	149.41	149.41	0.59
5	149.60	149.68	149.60	149.63	0.37	149.60	149.70	149.69	149.66	0.34	149.59	149.80	149.82	149.74	0.26
6	149.45	149.56	149.51	149.51	0.49	149.60	149.65	149.55	149.60	0.40	149.53	149.50	149.58	149.54	0.46
7	149.39	149.52	149.46	149.46	0.54	150.02	149.49	149.84	149.78	0.22	149.39	149.44	149.44	149.42	0.58
8	149.86	149.55	149.52	149.64	0.36	149.62	149.49	149.40	149.50	0.50	149.61	149.70	149.46	149.59	0.41
9	149.49	149.46	149.63	149.53	0.47	149.49	149.57	149.56	149.54	0.46	149.54	149.86	149.83	149.74	0.26
Розмір 10 мм															
10	10.08	10.05	10.03	10.05	0.05	10.14	10.10	10.08	10.11	0.11	10.04	10.08	10.07	10.06	0.06
11	10.28	10.45	10.37	10.37	0.37	10.43	10.38	10.29	10.37	0.37	10.30	10.45	10.45	10.40	0.40
12	10.20	10.14	10.16	10.17	0.17	10.16	10.14	10.12	10.14	0.14	10.17	10.14	10.15	10.15	0.15
13	10.14	10.24	10.24	10.21	0.21	10.34	10.43	10.28	10.35	0.35	10.09	10.10	10.13	10.11	0.11
14	10.18	10.28	10.23	10.23	0.23	10.30	10.31	10.22	10.28	0.28	10.30	10.25	10.20	10.25	0.25
15	10.20	10.14	10.16	10.17	0.17	10.16	10.19	10.14	10.16	0.16	10.16	10.13	10.12	10.14	0.14
16	10.10	10.16	10.10	10.12	0.12	10.20	10.08	10.06	10.11	0.11	10.08	10.16	10.07	10.10	0.10
17	10.07	10.04	10.08	10.06	0.06	10.02	10.03	10.06	10.04	0.04	10.09	10.10	10.08	10.09	0.09
18	10.11	10.09	10.11	10.10	0.10	10.04	10.08	10.09	10.07	0.07	10.18	10.03	10.16	10.12	0.12

саме розрахунку відхилення вимірюваного розміру від номінального значення у відсотках. Оскільки при виконанні матричних обчислень усі проміжні перетворення виконуються з підвищеною точністю, відхилення у відсотках від номіналу наведені до третього знаку після коми.

Значення досліджуваного розміру вимірювались в трьох паралельних площинах, за остаточне значення відхилення розміру від номіналу приймалось середнє значення за результатами трьох вимірів.

Отримана математична модель для функції відгуку:

$$\hat{y} = -0.723333 + 1.00074x_3 + 0.533056x_1z_2 - 0.469722x_1z_2x_3 - 0.291945x_1 + 0.288612x_1x_3 + 0.301297z_1 - 0.296852z_1x_3 + 0.281297z_2 - 0.227964z_2x_3 + 0.227315z_1x_2x_3 - 0.225463z_1x_2$$

де:  $x_1 = 0.05 \cdot (X_1 - 80)$ ;

$$z_1 = 1.5 \cdot (x_1^2 - 0.666667);$$

$$x_2 = 1 \cdot (X_2 - 1);$$

$$z_2 = 1.5 \cdot (x_2^2 - 0.666667);$$

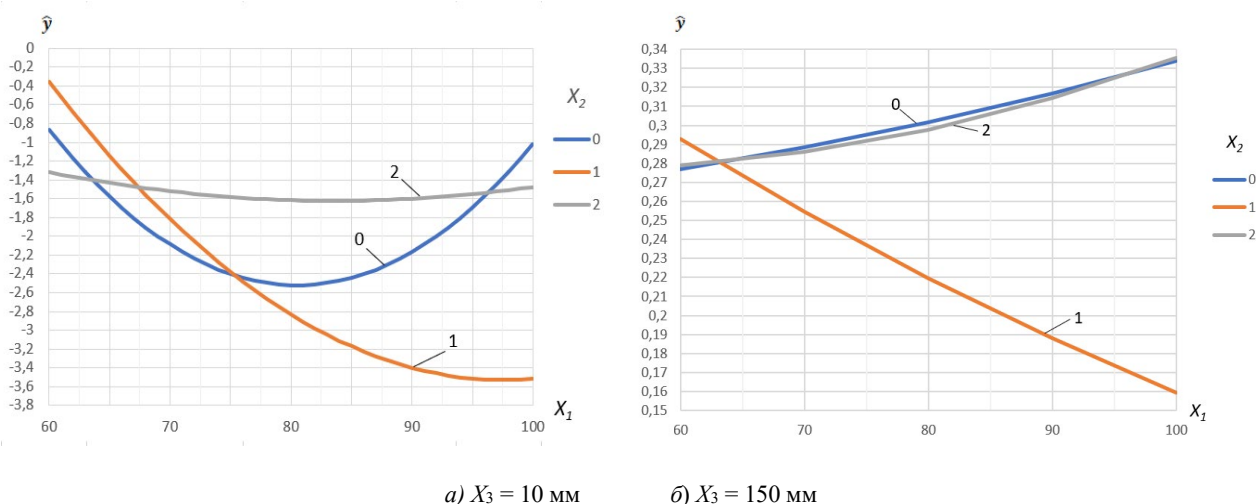
$$x_3 = 0.0142857 \cdot (X_3 - 80).$$

Статистичні характеристики, наведені у таблиці 4, свідчать про те, що отримана математична модель адекватна, інформативна, а також стійка як структурно, так і обчислювально.

Ступінь впливу окремих факторів на функцію відгуку оцінювався по відсотку участі та коефіцієнту кореляції з відгуком (табл. 5). З'ясовано, що найбільший вплив має значення вимірюваного розміру (майже 67%). З усіх інших факторів суттєвим є взаємний вплив першого і другого фактору (щільність і шаблон заповнення).

**Таблиця 4.** Статистичні характеристики математичної моделі

Параметри статистичного аналізу		Умовні позначення	Значення параметрів $\hat{y}$
Перевірка гіпотези про відтворюваність результатів експерименту	Дисперсія відтворюваності	$S_{відм}^2$	0.0813618
	Середнє квадратичне відхилення	$S_{відм}$	0.28524
	Число ступенів вільності для дисперсії відтворюваності	$f_{відм1}$	18
		$f_{відм2}$	1
	Експериментальне значення G-критерія	$G^{експ}$	0.701
	Критичне значення G-критерія	$G^{крит}$	0.418
Рівень значущості	$\alpha$	0.05	
Перевірка гіпотези про адекватність моделі	Дисперсія адекватності	$S_{ад}^2$	0.0926765
	Експериментальне значення F-критерія	$F^{експ}$	1.139
	Критичне значення F-критерія	$F^{крит}$	2.661
	Число ступенів вільності для адекватності	$f_{ад1}$	11
		$f_{ад2}$	6
	Рівень значущості	$\alpha$	0.05
Адекватність моделі	адекватна		
Аналіз отриманої моделі на інформативність	Коефіцієнт множинної кореляції	$R$	0.989664
	Число ступенів вільності для коефіцієнтів математичної моделі	$f_{k'}$	11
	Число ступенів вільності для остаточної суми квадратів	$f_{осмR}$	24
	Експериментальне значення F-критерія	$F^{експ}$	25.978
	Критичне значення F-критерія	$F^{крит}$	2.216
	Рівень значущості	$\alpha$	0.05
	Критерій Бокса і Веца	$\gamma$	2
	Інформативність математичної моделі	хороша	
Число обумовленості	$cond(X^T X)$	1	
Середнє абсолютних величин відносних похибок апроксимації, %	$ \bar{e}_{відм} $	11.98	
Середнє абсолютних величин абсолютних похибок апроксимації	$\ \bar{e}_u\ $	0.115185	
Частка розсіювання, що пояснюється математичною моделлю	$Q_{\hat{y}}$	0.98	



**Рис. 4.** Графіки маргінальних рівнянь регресії: а) при фіксованому  $X_3 = 10$  мм; б) при фіксованому  $X_3 = 150$  мм

**Таблиця 5.** Ступінь впливу факторів на функцію відгуку

Коефіцієнт	Частка впливу, %	Коефіцієнт кореляції з відгуком
$x_3$	66.67	0.817
$x_1z_2$	6.31	0.251
$x_1z_2x_3$	4.90	0.221
$x_1$	3.78	0.195
$x_1x_3$	3.70	0.192
$z_1$	3.02	0.174
$z_1x_3$	2.93	0.171
$z_2$	2.63	0.162
$z_2x_3$	1.73	0.132
$z_1x_2x_3$	1.15	0.107
$z_1x_2$	1.13	0.106

Характер залежності  $\hat{y}$  від факторів  $X_1$  та  $X_2$  ілюструється графіками маргінальних рівнянь регресії (рис. 4) та маргінальних поверхонь відгуку (рис. 5) при фіксованих рівнях фактору  $X_3 = 10$  мм та  $X_3 = 150$  мм.

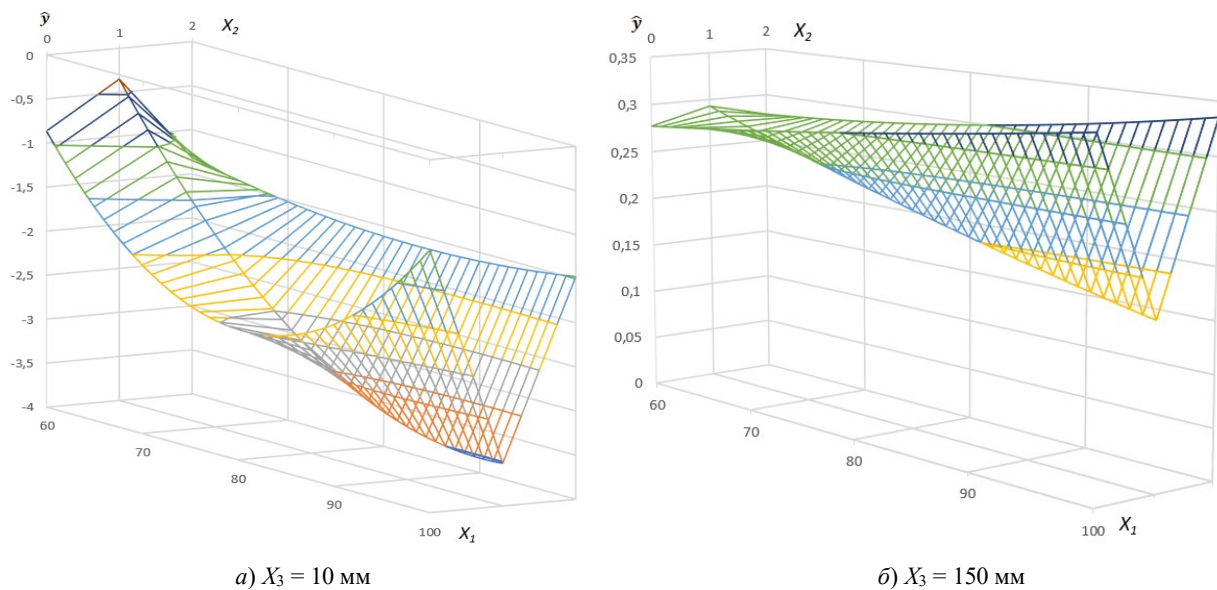
Аналіз графіків маргінальних рівнянь регресії (рис. 4) та маргінальних поверхонь відгуку (рис. 5) показав, що при використанні шаблону заповнення “Сітка” (значенні фактору  $X_2$ , що відповідає рівню 1) при збільшенні щільності заповнення від 60 % до 100 % (фактор

$X_1$  змінюється від 60 до 100) функція відгуку  $\hat{y}$  при зафіксованих рівнях фактору  $X_3$  веде себе протилежним чином: для розміру 10 мм ( $X_3 = 10$ ) функція відгуку  $\hat{y}$  віддаляється від оптимального значення  $\hat{y} = 0$ , а для розміру 150 мм ( $X_3 = 150$ ) функція відгуку  $\hat{y}$  навпаки, наближається до оптимального значення  $\hat{y} = 0$ . Це може бути викликано не самим значенням розміру, а його орієнтацією відносно осей (розмір 150 мм зорієнтований паралельно осі  $X$ , а розмір 10 мм – паралельно осі  $Y$ ), геометрією зразка, а також властивостями композиційного матеріалу. Підтвердження або спростування даної гіпотези потребує додаткових досліджень. При використанні шаблонів заповнення “Гіроїд” ( $X_2 = 0$ ) та “Динамічний куб” ( $X_2 = 2$ ) функція відгуку  $\hat{y}$  приймає значення, далекі від оптимального  $\hat{y} = 0$  при всіх досліджуваних варіантах щільності заповнення (фактор  $X_1$ ).

Для розміру 150 мм при щільності заповнення 60 % шаблон заповнення майже не впливає на відносне відхилення фактичного розміру від номінального. Для щільності заповнення 80 % отримано такі результати: шаблон заповнення “Сітка” демонструє кращий результат з точки зору точності розміру (точність вища на 40 %), ніж шаблони “Гіроїд” та “Динамічний куб”.

## Висновки

В результаті виконання дослідів відповідно до розробленого плану експерименту отримано емпіричну математичну модель, яка описує залежність точності геометричних розмірів від шаблону та щільності заповнення при використанні технології FFF для компо-



**Рис. 5.** Маргінальні поверхні відгуку: а) при фіксованому  $X_3 = 10$  мм; б) при фіксованому  $X_3 = 150$  мм

зиційного матеріалу *ABS pro CCF*. Аналіз статистичних характеристик показав, що отримана модель адекватна, інформативна, а також стійка як структурно, так і обчислювально.

Аналіз отриманої математичної моделі, зокрема графіків маргінальних рівнянь регресії та маргінальних поверхонь відгуку, дозволив сформулювати рекомендації щодо використання різних структур заповнення (шаблонів і щільності), а також напрями подальших досліджень, які подані нижче.

При друці матеріалом *ABS pro CCF* рекомендується враховувати, що структура заповнення може по-різному впливати на точність отримуваних розмірів. Для більшого розміру (150 мм) найкращий результат отримано для шаблону заповнення “Сітка”. Для мен-

шого розміру (10 мм) при різних варіантах щільності заповнення різні шаблони показали різний результат: для щільності 60 % кращим виявився шаблон “Сітка”; для щільності 80 % – “Динамічний куб”; для щільності, яка наближається до 100 % – “Гіроїд”.

Рекомендовані напрями подальших досліджень: отримання залежності точності розміру від структури заповнення при варіюванні фактору “вимірюваний розмір зразка” на більшій кількості рівнів, вивчення залежності точності розмірів від орієнтації зразка в зоні побудови при друці композиційним матеріалом *ABS pro CCF*, проведення додаткових досліджень для встановлення можливості узагальнення отриманих результатів і їх використання для інших матеріалів.

## References

- [1] V. Pasichnyk, S. Burburska, Y. Lashyna and V. Korenkov, “Integrated Process Model for Development and Manufacturing of Customized Orthopedic Implants,” V. Tonkonogyi, V. Ivanov, J. Trojanowska, G. Oborskyi and I. Pavlenko Eds., *Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Cham, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_18).
- [2] ISO/ASTM 52900:2021 “Additive manufacturing – General principles – Fundamentals and vocabulary,” International Organization for Standardization (ISO) 2021, ASTM International 2021.
- [3] A. Alafaghani and A. Qattawi, “Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method,” *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 36, pp. 164–174, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.09.025>.
- [4] C. Camposeco-Negrete, “Optimization of FDM parameters for improving part quality, productivity and sustainability of the process using Taguchi methodology and desirability approach,” *Progress in Additive Manufacturing*, Vol. 5., 2020, pp. 59–65, doi: <https://doi.org/10.1007/s40964-020-00115-9>.
- [5] S. K. Padhi, R. K. Sahu, S. S. Mahapatra, H. C. Das, A. K. Sood, B. Patro and A. K. Mondal, “Optimization of fused deposition modeling process parameters using a fuzzy inference system coupled with Taguchi philosophy,” *Advances in Manufacturing*, Vol. 5, pp 231–242, 2017, doi: <https://doi.org/10.1007/s40436-017-0187-4>.

- [6] M. Golab, S. Massey and J. Moultrie, “How generalisable are material extrusion additive manufacturing parameter optimisation studies? A systematic review,” *Heliyon*, Vol. 8, Issue 11, e11592, pp. 1–30, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11592>.
- [7] M. Zaborniak, M. Bremek, G. Budzik and J. Kluczyński, “Analysis of the Dimensional and Shape Accuracy and Repeatability of Models Produced in the Process of Additive Extrusion of Thermoplastic Polymers Using Fused Filament Fabrication Technology,” *Applied Sciences*, 14(15), 6404, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/app14156404>.
- [8] MonoFilament. ABS pro CCF (Carbon Fiber). Accessed: Dec. 5, 2024. Available: <https://monofilament.com.ua/ua/products/in-zhinernye-plastiki/kompozitsionnye-materialy-dlja-3d-printera/abs-pro-ccf-carbon-fiber-01-75mm-ves0-75kg>
- [9] UltiMaker Cura. Accessed: Dec. 5, 2024. Available: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/>
- [10] S. Lapach, S. Radchenko, P. Babich, *Planning, regression and analysis of PRIAM models* (PRIAM), Kyiv, 1993.

## Dependence of the parts dimensions’ accuracy on the internal structure of the layers when 3D printing using Fused Filament Fabrication technology

Pavlo Mishchenko<sup>1</sup>, Yuliia Lashyna<sup>1</sup>, Volodymyr Frolov<sup>1</sup>, Sergii Lapach<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** This paper presents the results of the study of the obtained dimensions’ accuracy depending on the internal structure of the layers when manufacturing samples from the composite material ABS pro CCF using the Fused Filament Fabrication technology. The accuracy was estimated as the deviation of the actual obtained dimension from the nominal dimension of the sample in percent depending on the following factors: infill pattern, infill density and nominal dimension value. The experiments were conducted using the full factorial experiment method. Regression models were built using the PRIAM software. Analysis of the obtained model, in particular, the graphs of marginal regression equations and marginal response surfaces, showed that the structure of the infill can differently affect the accuracy of the obtained dimensions: for example, for larger dimension, the best result was obtained when using the “Grid” infill pattern. For a smaller dimension (10 mm), for different infill density options, different patterns showed different results: for a density of 80%, the “Cubic Subdivision” infill pattern turned out to be the best; for a density of 60%, the “Grid” infill pattern was the best. When using the “Grid” infill pattern, as the infill density increases from 60% to 100%, the response function behaves in the opposite way for small and medium dimensions: for a dimension of 10 mm, the response function moves away from the optimal value  $\hat{y} = 0$ , and for a dimension of 150 mm, the response function, on the contrary, approaches the optimal value  $\hat{y} = 0$ . The explanation of this phenomenon requires additional research, in particular with a larger number of levels of variation of the measured dimension, as well as taking into account the location of the measured dimension relative to the printer coordinate system during the build.

**Keywords:** 3D printing, Additive Technologies, composite materials, Fused Filament Fabrication, regression analysis.

---