

І. Ш. НЕВЛЮДОВ, Р. Є. СТРИЛЕЦЬ

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ФОТОПОЛІМЕРНОГО ДРУКУ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ДЕТАЛЕЙ

Проведено математичний аналіз результатів експериментального дослідження відхилення розмірів базових шарів в залежності від технологічних параметрів як час експонування базових шарів, товщина базових шарів та кількість базових шарів за допомогою регресійного аналізу. В результаті дослідження надруковано 27 тестових моделей з різними технологічними параметрами для визначення впливу окремих параметрів на відхилення розмірів. В результаті аналізу визначено, що два параметри мають значний вплив на відхилення розмірів, це параметри час експонування та кількість базових шарів а один параметр – товщина базового шару не має значного впливу на результат друку. Визначення впливу технологічних параметрів на показники якості моделі дозволить скоротити процес підготовки деталі до друку і оптимізувати процес друку.

Ключові слова: 3D-друк, стеріолітографія, фотополімер, LCD, DLP, SLA, показники якості деталей, дефекти.

I. NEVLIUDOV, R. STRELETS

THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF PHOTOPOLYMER PRINTING ON THE QUALITY INDICATORS OF PARTS

A mathematical analysis of the experimental study results was conducted to investigate the dimensional deviations of base layers depending on such technological parameters as exposure time of the base layers, thickness of the base layers, and the number of base layers using regression analysis. As part of the study, 27 test models with varying technological parameters were printed to determine the influence of individual parameters on dimensional deviations. The analysis revealed that two parameters significantly affect dimensional deviations: exposure time and the number of base layers. In contrast, the thickness of the base layer does not have a significant impact on the printing outcome. Identifying the influence of technological parameters on the quality indicators of the model will help reduce the part preparation time for printing and optimize the printing process itself.

Keywords: 3D printing, stereolithography, photopolymer, LCD, DLP, SLA, quality indicators of parts, defects.

1. Вступ. На сьогодні одним з головних завдань у фотополімерному друці є оптимізація самого процесу та скорочення витрат часу на визначення технологічних параметрів через велику кількість різноманітних принтерів з різною конструкцією та різних за фізико-хімічними властивостями фотополімерами, показники якого впливають на технологічні параметри друку, на що витрачається значна трудомісткість. Таким чином необхідно оптимізувати технологічний процес підготовки деталі до друку та самого друку деталі. Це можливо зробити визначивши вплив всіх основних технологічних параметрів, на вихідні показники якості. Для визначення цього впливу проведено експериментальні дослідження, які полягають в друці 27 тестових моделей і в подальшому аналізі за допомогою регресійного аналізу.

2. Мета дослідження. Визначити вплив окремих технологічних факторів на показники якості деталі надрукованих за технологією стеріолітографії за допомогою математичного аналізу у вигляді нелінійної багатофакторної регресії.

3. Викладання основного матеріалу та результати. Для контролю параметрів якості деталей необхідно визначити вплив основних технологічних параметрів на кількісні показники відхилень дефектів. Таким чином, для першого дослідження взято відхилення розмірів базових шарів від заданих у моделі в залежності від трьох параметрів, які найбільше можуть впливати на отриманий результат: товщина базових шарів, час експонування базових шарів та кількість базових шарів.

Для проведення експерименту зроблено просту 3D-модель, яка має форму куба з розмірами 20x20x5 з товщиною стінки 4 мм. Розміри даної моделі вибрані враховуючи мінімізацію використання фотополімеру та отримання результатів з мінімальною похибкою. Розмір вимірюваних шарів по вертикалі буде складатися від 0.1 до 0.9 мм, так як для дослідження взято кількість базових шарів від 2 до 6 з товщиною від 50 до 150 мкм. Час експонування взято враховуючи властивості фотополімерного принтера, зокрема наявність в ньому монохромного екрану, що зменшує час експонування в 3-5 разів у порівнянні зі повнокольоровими екранами а також досвіду друку, що визначило мінімально можливий час експонування для конкретної смоли та принтера та при якому модель залишається на платформі.

Модель для проведення дослідження зображена на рисунку 1.

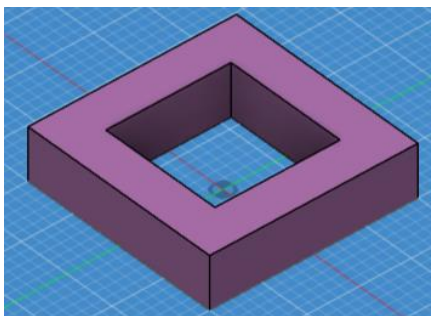


Рис. 1 – Тестова модель для дослідження відхилення базових шарів від звичайних

© І. Ш. Невлюдов, Р. Є. Стрілець, 2025

Таким чином для проведення багатофакторного регресійного аналізу взято три фактори: час експонування базових шарів, товщина базових шарів та їх кількість. В результаті проведення експериментальних досліджень у вигляді друку тестових моделей отримано значення відхилення базових шарів, які виміряні за допомоги спеціального вимірювального пристрою: штангенциркуля, що має похибку до 5 мкм(рис. 2).



Рис. 2– Вимірювання розмірів відхилення базових шарів

В результаті друку тестової моделі з різними параметрами отримано 27 моделей (рис. 3).



Рис. 3 – Отримані моделі в результаті друку

Числові значення факторів та отриманих результатів зведено в таблицю 1.

Таблиця 1 – Результати друку тестових моделей в залежності від технологічних параметрів

№	Час експонування базових шарів, сек	Товщина базового шару, мкм	Кількість базових шарів, шт	Відхилення розмірів базових шарів, мм
1	16,00	50,00	2,00	0,42
2	23,00	50,00	2,00	0,76
3	30,00	50,00	2,00	0,88
4	16,00	100,00	2,00	0,50
5	23,00	100,00	2,00	0,84
6	30,00	100,00	2,00	0,87
7	16,00	150,00	2,00	0,54
8	23,00	150,00	2,00	0,72
9	30,00	150,00	2,00	0,86
10	16,00	50,00	4,00	0,60
11	23,00	50,00	4,00	0,78
12	30,00	50,00	4,00	0,93
13	16,00	100,00	4,00	0,65
14	23,00	100,00	4,00	0,84
15	30,00	100,00	4,00	1,00
16	16,00	150,00	4,00	0,60
17	23,00	150,00	4,00	0,76
18	30,00	150,00	4,00	1,00
19	16,00	50,00	6,00	0,55
20	23,00	50,00	6,00	0,61
21	30,00	50,00	6,00	0,84
22	16,00	100,00	6,00	0,73
23	23,00	100,00	6,00	0,90
24	30,00	100,00	6,00	0,93
25	16,00	150,00	6,00	0,75
26	23,00	150,00	6,00	0,96
27	30,00	150,00	6,00	1,20

Як видно з таблиці 1 в якості значень для фактору час експонування взято три значення 16, 23 та 30 секунд. Для товщини шару взято 50, 100, та 150.

Для кількості базових шарів взято 2, 4 та 6 шарів.

В подальшому ці фактори отримали позначення час експонування – а, товщина базового шару – b та кількість шарів – с. Розміри відхилення отримали позначення d. Всі значення зведено в таблицю 2.

Таблиця 2 – Прийняті позначення

Фактори	Час експонування базових шарів, сек	Товщина базових шарів, мкм	Кількість базових шарів, шт	Відхилення від заданих розмірів, мм
Позначення	a	b	c	d
Позначення МФЕ	x_1	x_2	x_3	y
Верхній ліміт(1)	30	150	6	-
Основний рівень	23	100	4	-
Нижній ліміт(-1)	16	50	2	-

Матриця проведення багатфакторного регресійного аналізу відображена в таблиці 3.

Таблиця 3 – Матриця проведення багатofакторного регресійного аналізу

Номер експеримента	a	b	c	x1	x2	x3	x1*x2	x1*x3	x2*x3	x1*x2*x3	x1*x1	x2*x2	x3*x3	y
1	16	50,00	2,00	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	0,42
2	23	50,00	2,00	0	-1	-1	0	0	1	0	0	1	1	0,76
3	30	50,00	2,00	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	0,88
4	16	100,00	2,00	-1	0	-1	0	1	0	0	1	0	1	0,50
5	23	100,00	2,00	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	1	0,84
6	30	100,00	2,00	1	0	-1	0	-1	0	0	1	0	1	0,87
7	16	150,00	2,00	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	0,54
8	23	150,00	2,00	0	1	-1	0	0	-1	0	0	1	1	0,72
9	30	150,00	2,00	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	0,86
10	16	50,00	4,00	-1	-1	0	1	0	0	0	1	1	0	0,60
11	23	50,00	4,00	0	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	0,78
12	30	50,00	4,00	1	-1	0	-1	0	0	0	1	1	0	0,93
13	16	100,00	4,00	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,65
14	23	100,00	4,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,84
15	30	100,00	4,00	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1,00
16	16	150,00	4,00	-1	1	0	-1	0	0	0	1	1	0	0,60
17	23	150,00	4,00	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0,76
18	30	150,00	4,00	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1,00
19	16	50,00	6,00	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	0,55
20	23	50,00	6,00	0	-1	1	0	0	-1	0	0	1	1	0,61
21	30	50,00	6,00	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	0,84
22	16	100,00	6,00	-1	0	1	0	-1	0	0	1	0	1	0,73
23	23	100,00	6,00	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0,90
24	30	100,00	6,00	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0,93
25	16	150,00	6,00	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	0,75
26	23	150,00	6,00	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0,96
27	30	150,00	6,00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,20

Основне рівняння багатofакторної регресії має наступний вигляд:

$$\tilde{y}_i = a_1 x_{1i} + a_2 x_{2i} + \dots + a_m x_{mi} + b \quad (1)$$

Для визначення коефіцієнта регресії використовується наступна формула:

$$b_i = \frac{\sum_1^n (y_i \cdot x_i)}{n}, \quad (2)$$

де: b_i – коефіцієнт регресії;
 n – кількість проведених дослідів;
 y_i – значення функції y ;
 x_i – значення фактору.

Таким чином отримано виходячи з матриці проведення експерименту 10 коефіцієнтів регресії, що зведені до таблиці 4.

Таблиця 4 – Коефіцієнти регресії

Коефіцієнт регресії	Значення
b_1	0,117407407
b_2	0,037777778
b_3	0,04
b_4	0,003333333
b_5	-0,007777778
b_6	0,095185185
b_7	0,011111111
b_8	0,512962963
b_9	0,50962963
b_{10}	0,513333333
b_0	0,78

Перші три коефіцієнта відповідають за лінійну частину регресійного аналізу, b_4 - b_7 відповідають за парну взаємодію між факторами, b_8 - b_{10} відповідають за квадратичні ефекти взаємодії між факторами, b_0 – нульовий коефіцієнт регресії.

Загальне рівняння регресії буде мати наступний вигляд:

$$y = 0.78 + 0.11x_1 + 0.037x_2 + 0.04x_3 + 0.0033x_1x_2 - 0.0077x_1x_3 + 0.095x_2x_3 + 0.011x_1x_2x_3 + 0.51x_1^2 + 0.509x_2^2 + 0.51x_3^2 \quad (3)$$

Далі необхідно перевірити коефіцієнти регресії по критерію Стьюдента. Для цього визначено дисперсію залишків, яка становить 0.05.

Після визначення дисперсії була виконана перевірка значущості коефіцієнтів за допомогою t-тесту по критерію Стьюденту. Формула t-тесту має наступну форму:

$$t_i = \frac{b_i}{SE(b_i)} \quad (4)$$

де $SE(b_i)$ – стандартна помилка коефіцієнта, яка розраховується з дисперсії залишків.

В результаті отримано таблицю 5 з результатами розрахунку T-тесту для кожного коефіцієнту:

Таблиця 5 – Результат розрахунку t-тесту для кожного коефіцієнта регресії

t0	3,857404884
t1	1,497988576
t2	0,849726096
t3	0,874360939
t4	0,252406262
t5	-0,016582278
t6	1,348793399
t7	0,460828678
t8	3,131149161
t9	3,120959171
t10	3,132279336

Для подальшої перевірки отриманих тестів для кожного коефіцієнта взято табличне значення коефіцієнта Стьюдента з використанням довірчої ймовірності 0.95 та з числом ступенів свободи 26, що становить 2.055.

В результаті лише три коефіцієнта відповідають умовам та більше за табличний коефіцієнт. Ці коефіцієнти зведені в таблицю 2.6.

Таблиця 6 – Коефіцієнти Стьюдента, що більші за табличний коефіцієнт 2.055.

t0	3,857
t8	3,131
t9	3,12
t10	3,132

Ці коефіцієнти Стьюдента відповідають коефіцієнтам регресії, які також зведені в таблицю 7.

Таблиця 7 – Значущі коефіцієнти регресії

b0	0.78
b ₈	0.513
b ₉	0.509
b ₁₀	0.513

Тоді загальне рівняння регресії з урахуванням значущих коефіцієнтів буде мати наступний вигляд:

$$y = 0.78 + 0.513x_1^2 + 0.509x_2^2 + 0.513x_3^2 \quad (5)$$

В подальшому розрахунки

виконані в спеціальному ПЗ Statistica. Отримано коефіцієнти детермінації та кореляції(табл. 8), які свідчать про те, що зв'язок між множинами в рівнянні регресії має лінійний зв'язок.

Таблиця 8 – Результат розрахунків коефіцієнтів кореляції та уточненого коефіцієнта кореляції

Summary Statistics; DV:	
Statistic	Value
Multiple R	0,908904741
Multiple R ²	0,826107827
Adjusted R ²	0,794491069
F(4,22)	26,1287957
p	0,0000000443455868
Std.Err. of Estimate	0,0813444478

Виходячи з таблиці квадрат коефіцієнта множинної кореляції становить 0.908, що є більшим за 0.7, яке відповідає критерію Фішера, тобто можна вважати, що варіація обумовлена впливом факторів.

Далі можливо проаналізувати залишки, які отримані в ПЗ Statistica. Для перевірки залишків на наявність автокореляції розраховано статистику Дарбіна-Уотсона, що зображено на рисунку 4.

Durbin-Watson d (Аркуш3 in 1) and serial correlation of residuals		
	Durbin-Watson d	Serial Corr.
Estimate	1,425372	0,233044

Рис. 4 – Розраховане значення статистики Дарбіна-Уотсона

Таким чином значення становить 1,425 при $n=27$ та $k=3$, тоді табличне значення значущих точок для 5% рівня значущості $d_l=1,16$ а $d_u=1,65$. Таким чином, значення отримане в результаті розрахунків 1,425 є меншим ніж значення d_u , яке становить 1,65, тоді можливо зазначити, що в моделі є автокореляція залишків. подальшому отримано декілька графіків залишків.

Для оцінки адекватності моделі побудували нормальний вірогідний графік залишків, що зображений на рисунку 5.

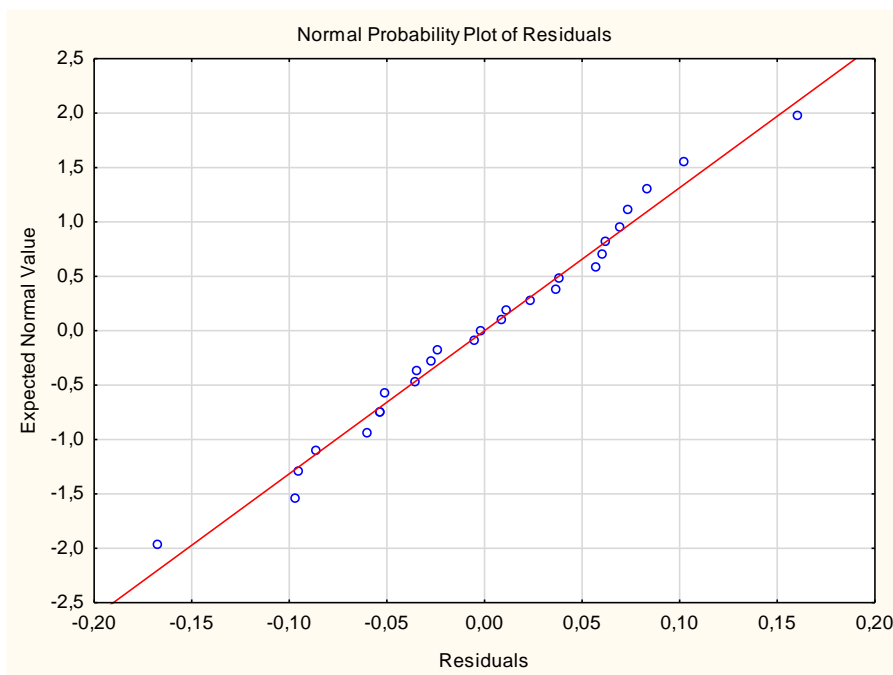


Рис. 5 – Нормальний вірогідний графік залишків

Із графіка видно, що залишки добре лягають на пряму, що відповідає нормальному закону розподілення.

Далі отриманий графік залежності регресійних залишків від передбачуваного значення залежної змінної для визначення нестабільності дисперсії похибки рівняння. Цей графік зображений на рисунку 6.

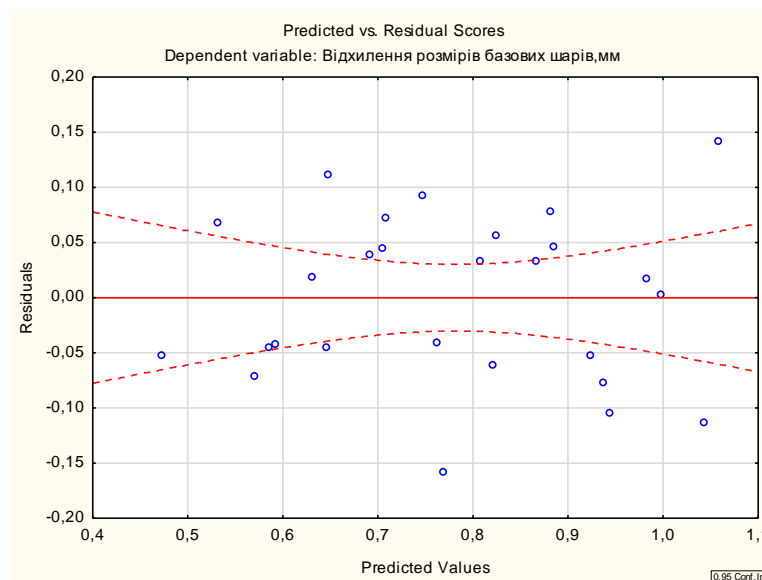


Рис. 6 – Графік залежності регресійних залишків від передбачуваного значення

На графіку можна побачити границю довірчого інтервалу та середнє значення залишків. Також можливо відзначити, що залишки не залежать від передбачених по рівнянню регресії значень відгуків та розкидані хаотично відносно прямої та між ними немає закономірності розподілу, таким чином модель адекватно описує вхідні дані.

Загальна гістограма залишків зображена на рисунку 7. В результаті аналізу цієї гістограми можливо визначити те, що вона є відносно симетричною, що свідчить про те, що залишки нормально розподілені.

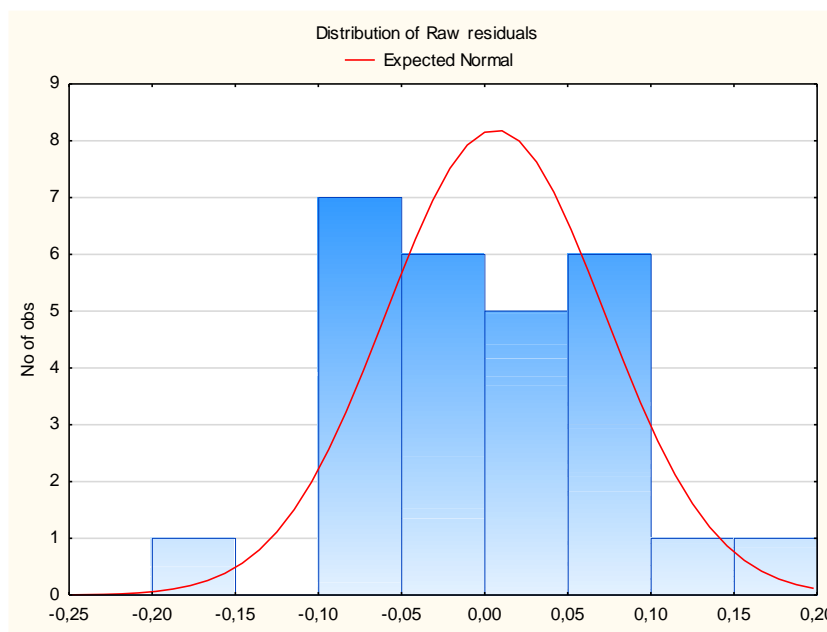


Рис. 7 – Загальна гістограма залишків

В результаті для визначення відносного впливу таких факторів як час експонування(а), товщина базових шарів(б) та кількість базових шарів(с) на розміри відхилення базових шарів розраховано за формулами:

$$r_a^2 = \frac{t_a^2 * R^2}{t_a^2 + t_b^2 + t_c^2}, \tag{6}$$

де: t_a – отримане раніше значення t-критерію для фактора часу експонування;

t_b – отримане раніше значення t-критерію для фактора товщини базових шарів;

t_c – отримане раніше значення t-критерію для фактора кількість базових шарів;

R^2 – коефіцієнт детермінації, який має значення 0.82.

Таким чином розраховано вплив по вищевказаній формулі і для інших факторів. В подальшому результат розрахунків зведені в таблицю 9.

Таблиця 9 – Значення відносного впливу факторів на розміри відхилення базових шарів

r^2	Значення
r_a^2	0,71543
r_b^2	0,074071
r_c^2	0,083042

В подальшому розраховано коефіцієнт еластичності, що показує на скільки відсотків зростає показник у при зростанні окремих факторів на 1%.

Формула для розрахунку коефіцієнта еластичності:

$$KE_n = a_n * \frac{x_n}{y} \tag{7}$$

В подальшому отримані значення зведені до таблиці 10.

Таблиця 10 – Коефіцієнти еластичності

Фактор	KE, %
Час експонування базових шарів	3,456565
Товщина базових шарів	4,752617
Кількість базових шарів	0,205519

В подальшому розраховано теоретичні значення підставляючи значення факторів в отримане рівняння регресії та зведено в таблицю 11.

Таблиця 11 – Зведена таблиця факторів, вихідної величини у практичного та отримане значення у теоретичного.

Час експонування базових шарів, сек	Товщина базового шару, мкм	Кількість базових шарів, шт	Відхилення розмірів базових шарів, мм	Теоретичне відхилення розмірів базових шарів, мм
16,00	50,00	2,00	0,42	0,485740741
23,00	50,00	2,00	0,76	0,661851852
30,00	50,00	2,00	0,88	0,837962963
16,00	100,00	2,00	0,50	0,542407407
23,00	100,00	2,00	0,84	0,718518519
30,00	100,00	2,00	0,87	0,89462963
16,00	150,00	2,00	0,54	0,599074074
23,00	150,00	2,00	0,72	0,775185185
30,00	150,00	2,00	0,86	0,951296296
16,00	50,00	4,00	0,60	0,545740741
23,00	50,00	4,00	0,78	0,721851852
30,00	50,00	4,00	0,93	0,897962963
16,00	100,00	4,00	0,65	0,602407407
23,00	100,00	4,00	0,84	0,778518519
30,00	100,00	4,00	1,00	0,95462963
16,00	150,00	4,00	0,60	0,659074074
23,00	150,00	4,00	0,76	0,835185185
30,00	150,00	4,00	1,00	1,01296296
16,00	50,00	6,00	0,55	0,605740741
23,00	50,00	6,00	0,61	0,781851852
30,00	50,00	6,00	0,84	0,957962963
16,00	100,00	6,00	0,73	0,662407407
23,00	100,00	6,00	0,90	0,838518519
30,00	100,00	6,00	0,93	1,01462963
16,00	150,00	6,00	0,75	0,719074074
23,00	150,00	6,00	0,96	0,895185185
30,00	150,00	6,00	1,20	1,071296296

Отримана діаграма зображена на рисунку 8. Вона показує відхилення прогнозованих значень вихідної величини від тих значень, що отримані в результаті проведення експерименту – друку тестових моделей. Відхилення значень становлять від 40 до 130 мкм.

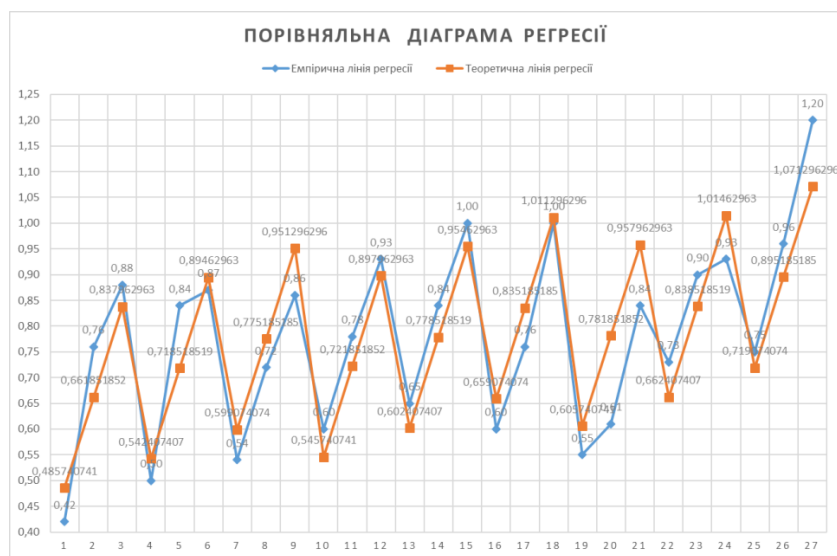


Рисунок 8 – Порівняльна діаграма регресії

Висновки. Таким чином, в результаті проведення експериментального дослідження з використанням регресійного аналізу встановлено, що найбільше на відхилення розмірів базових шарів впливають лише 2 фактори, такі як час експонування та кількість базових шарів, натомість товщина шару має найменший вплив на відхилення розмірів. Отримані результати являються основою для розробки технологічних процесів фотополімерного друку.

Список літератури:

1. Регресійний аналіз. URL: [https://ukrayinska.libretexts.org/Статистика/Прикладна_статистика/Книга%3A_Статистика_бізнесу_\(OpenStax\)/13%3A_Лінійна_регресія_та_кореляція/13.04%3A_Рівняння_регресії\(дата_звернення:_09.01.2025\).](https://ukrayinska.libretexts.org/Статистика/Прикладна_статистика/Книга%3A_Статистика_бізнесу_(OpenStax)/13%3A_Лінійна_регресія_та_кореляція/13.04%3A_Рівняння_регресії(дата_звернення:_09.01.2025).)
2. Основи кореляційного та регресійного аналізу. URL: https://pchilka-litsei.in.ua/excel-book/basis_analysis.html (дата звернення: 09.01.2025).
3. Метод регресійного аналізу в MS Excel. URL: <https://modeling.at.ua/publ/10-1-0-58>(дата звернення: 09.01.2025).
4. Нікітін Д.О., Стрілець Р.Є., Близняк Д.С. Сравнительный анализ технологий 3D прототипирования SLA, DLP и LCD. Разработка автоматизированной станции для 3D печати. VII Міжнародна науково-технічна Internet-конференція «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами» (HVXT).2020 С. 55–56.
5. 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
6. 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>
7. Стереолітографія – що потрібно знати про технологію. URL: <https://www.3dprinter.ua/stereolitografiya-shho-potribno-znaty-pro-tehnologiyu/>(дата звернення: 09.01.2025).
8. Методи і техніка досліджень. URL: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/ophv_10/page3.html(дата звернення: 09.01.2025).
9. Методологія і організація наукових досліджень URL: https://shron1.chtyvo.org.ua/Burhu_Yurii/Metodolohiia_i_orhanizatsiia_naukovykh_doslidzhen.pdf (дата звернення: 09.01.2025).
10. Основи наукових досліджень. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/162019668.pdf>(дата звернення: 09.01.2025).

References (transliterated)

1. 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).
2. 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).
3. 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).

4. Nikitin D.O., Strilets R.E., Blyzniuk D.S. "Porivnyalnyi analiz tekhnolohiyi 3D prototypyrovaniya SLA, DLP y LCD. Razrabotka avtomatyzyrovanoi stantsiyi 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.
5. 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
6. 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>
7. 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).
8. 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).
9. Methodology and organization of scientific research [Metodolohiia i orhanizatsiia naukovykh doslidzhen]: available at: https://shron1.chtyvo.org.ua/Burhu_Yurii/Metodolohiia_i_orhanizatsiia_naukovykh_doslidzhen.pdf (last accessed: 29.05.2024).
10. Basics of the scientific research [Osnovy naukovykh doslidzhen]: available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/162019668.pdf> (last accessed: 29.05.2024).

Відомості про авторів / About the Authors

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

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