

УДК 681.625.8

DOI: 10.20535/2077-7264.1(79).2023.277426

© М. Ю. Володько, магістрантка, Т. Є. Клименко,
канд. техн. наук, доц., Н. Л. Талімонова, канд. техн. наук,
доц., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ АДИТИВНОГО 3D ДРУКУ НА ЯКІСТЬ СУВЕНІРНОЇ ПРОДУКЦІЇ

За результатами експериментальних досліджень точності відтворення 3D виробів виготовлених за технологією FDM-друку встановлено математичні залежності показників якості поверхні 3D виробів від технологічних параметрів процесу їх виготовлення. Отримано залежності впливу зміни швидкості друку, товщини бічної стінки виробу та внутрішніх стінок заповнювача на шорсткість поверхні та розмірні характеристики кінцевого виробу. Визначено оптимальні значення вхідних параметрів, що дозволяють досягти мінімальної шорсткості поверхні 3D виробів, виготовлених за адитивними технологіями.

Ключові слова: 3D друк; адитивне виробництво;
сувенірна продукція; точність відтворення сувенірних
виробів; шорсткість поверхні 3D виробу.

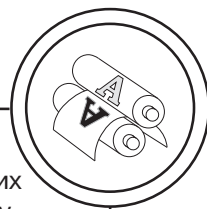
Постановка проблеми

Перед підприємствами поліграфічної сфери рекламно-сувенірного спрямування постає питання щодо спрощення та зниження вартості виготовлення поліграфічних виробів або їх складових частин й водночас покращення їх якісних показників та конструктивних характеристик. До основних оптимізаційних рішень можна віднести: раціональний вибір методу обробки 3D виробів, а саме застосування сучасних методів, котрі знижують собівартість обробки; раціональні рішення щодо технологічного процесу виготовлення 3D виробів, а саме зменшення кількості операцій, або за-

міна робочих місць на автоматизовані, що дозволяє економити на кваліфікації працівників; оптимізація додрукарських процесів по роботі із 3D виробами [1].

Використання адитивних технологій дозволяє суттєво зменшити витрати на отримання 3D виробів сувенірної продукції [2], починаючи з додрукарських операцій та закінчуючи повноцінними моделями, які в повному обсязі задовольняють замовника. До основних вимог, що висуваються до сувенірних 3D виробів можна віднести: відповідність розмірних характеристик, параметрів міцності та параметрів шорсткості поверхні виробів.

© Автор(и) 2023. Видавець КПІ ім. Ігоря Сікорського.
CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



При використанні 3D друку виникають похибки точності відтворення поверхонь готових виробів, які необхідно враховувати ще на етапі моделювання. На рельєф поверхні 3D виробів впливають такі параметри: похибка ширини екструзії, точність позиціонування, інерційне биття в екструдері, похибка друку першого шару, місця відриву під час друкування, швидкість подачі матеріалу, температура плавлення, усадження та пористість матеріалу [3, 4].

При виготовленні прототипів 3D сувенірів найбільш важливими є характеристики точності відтворення розмірних характеристик та шорсткості поверхні виробів, оскільки технологія виготовлення 3D виробів, не дозволяє отримати ідеально рівні поверхні. Через пошарове нанесення матеріалу на бокових і вертикальних частинах сувенірів завжди будуть зберігатися борозни та невеликі виступи [3]. Саме тому сувенірна 3D продукція не може використовуватися одразу після 3D друку, оскільки у процесі друкування на поверхні виробів залишаються недоліки, які потребують подальшого усунення. Після аналізу виробів, створених методом наплавлення матеріалів FDM (Fused Deposition Modeling), встановлено, що всі недоліки на етапі друку прибрати практично неможливо, оскільки елементи 3D виробу створюються шляхом нанесення суцільних поверхневих шарів і на них залишається небажаний рельєф [5]. Усунути можливо недоліки друку, що виникли через неправильне налаштування режимів друку на 3D обладнанні, некоректне програмне моделювання, не-

відповідне зберігання витратних матеріалів. Підвищення якості сувенірної 3D продукції пов'язано із багатьма чинниками, починаючи від налаштувань в процесі моделювання та встановлених технологічних режимів 3D друку та закінчуючи особливостями витратних матеріалів, та впливом зовнішнього середовища. Тому важливим є етап дослідження технологічних параметрів, що включають визначення розмірних характеристик та шорсткості поверхні 3D виробів.

Мета роботи

Визначення технологічних параметрів виготовлення 3D виробів, зокрема, швидкості друку, товщини бічної стінки виробу та внутрішніх стінок заповнювача, що дозволяють досягти мінімальної шорсткості поверхні 3D виробів та мінімальних відхилень розмірних характеристик кінцевого виробу від запроєктованих.

Результати проведених досліджень

Для проведення експериментальних досліджень використано програмне забезпечення Blender 3D 3.5, за допомогою якого розроблено 3D моделі у виді шестигранників для восьми експериментальних зразків із заданими розмірними характеристиками: $s = 10$ мм, $A_1 = 20$ мм, $A_2 = 20$ мм; $A_3 = 20$ мм (рис. 1). Моделі збережено у форматі .STL для подальшого друку на обладнанні 3D XYZprinting da Vinci 1.0 PRO [6].

На жорсткість та міцність 3D виробу впливає товщина бічної стінки 3D виробу та відсоток заповнення внутрішнього об'єму моделі, тобто товщина внутрішніх

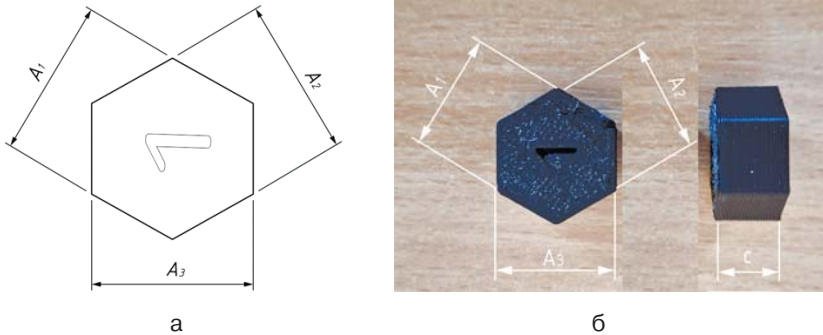


Рис. 1. Моделі досліджуваного зразка із заданими розмірними характеристиками: а — на етапі моделювання, б — після 3D друку

стінок заповнювача та їх щільність. Тому вхідними параметрами дослідження зразків обрано:

- товщина внутрішніх стінок заповнювача, δ_1 : в діапазоні від 0,5 до 3 мм;
- товщина бічної стінки виробу, δ_2 : в діапазоні від 0,5 до 5 мм;
- швидкість друку, V : в діапазоні від 30 до 60 мм/с;
- робочу температуру екструдера $T = 200^\circ \text{C}$.

Вихідними параметрами дослідження обрано показники шорсткості та точності відтворення розмірних характеристик 3D виробу.

Під час проведення експериментальних досліджень встановлено, що технологічні параметри впливають на властивості отриманих 3D сувенірів, тому необхідно визначити залежність параметрів отриманого поліграфічного виробу від вхідних величин.

Попереднім етапом експерименту було проектування моделі зразків для 3D друку, а також розрахунок кількості експериментальних дослідів.

Визначення кількості дослідів необхідних для реалізації всіх можливих комбінацій проводилось за формулою:

$$N = 2^k, \quad (1)$$

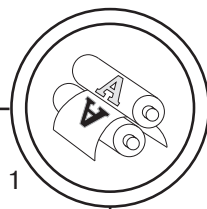
де N — кількість дослідів, k — кількість змінних параметрів.

Змінні параметри режимів процесу друкування на 3D принтері, а саме товщина внутрішніх стінок заповнювача, δ_1 ; товщина бічної стінки виробу, δ_2 ; швидкість друку V , вказують на кількість вхідних параметрів, тобто $k = 3$.

$$N = 2^3 = 8. \quad (2)$$

Отже, як видно із розрахунків, зразків має бути — вісім одиниць. Кожен змодельований зразок відмічено власним порядковим номером, що відповідає положенню зразка під час друку. Виготовлення зразків здійснювалося за вхідними параметрами, що наведено в табл. 1.

Проведено вимірювання фактичних розмірів досліджуваних зразків, а саме параметрів шорсткості профілів поверхонь надрукованих виробів (R_a) за допомогою профілометра MarSurf PS10 Mahr [9] та визначено розміри надрукованих виробів (A_1 , A_2 , A_3) за допомогою мікрометром МКУК-25 [10]. Отримані результати представлено у табл. 2.



Таблиця 1

Вхідні параметри дослідних зразків 3D виробів на етапі моделювання

Вхідні параметри	Номер досліджуваного зразка							
	1	2	3	4	5	6	7	8
δ_1 , мм	3	3	0,5	0,5	3	3	0,5	0,5
δ_2 , мм	0,5	5	0,5	5	0,5	5	5	0,5
V, мм/с	30	30	30	30	60	60	60	60

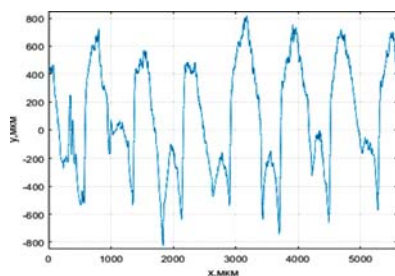
Таблиця 2

Технологічні параметри готових надрукованих 3D виробів

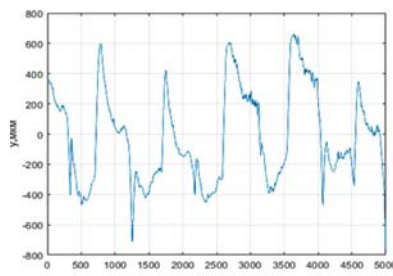
Найменування параметру	Номер досліджуваного зразка							
	1	2	3	4	5	6	7	8
R_a , мкм	6,82	8,07	9,81	9,06	4,44	2,82	4,88	4,32
A_1 , мм	20,44	20,47	20,42	20,45	20,46	20,47	20,08	20,43
A_2 , мм	20,36	20,33	20,33	20,37	20,27	20,29	20,46	20,36
A_3 , мм	20,07	20,15	20,05	20,01	20,04	20,02	20,08	20,01

За допомогою профілометра проводилися вимірювання бічної стінки та внутрішніх стінок виробів

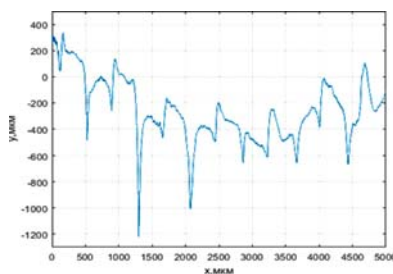
для досліджуваних зразків. На основі значень середнього арифметичного відхилення профілю (R_a)



а



б



в

Рис. 2. Профілограми поверхні 3D виробів досліджуваних зразків:
а — зразок № 1, бічна стінка;
б — зразок № 4, бічна стінка;
в — зразок № 6, внутрішня стінка



побудовано профілограми шорсткості поверхні досліджуваних зразків 3D виробів (рис. 2).

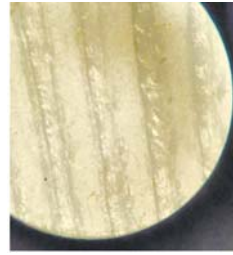
Дослідження якості поверхонь експериментальних зразків оцінювалось за допомогою цифрового мікроскопу типу Globisens Digiscope QX7 [11]. Отримані у мікроскопі зображення структури різних поверхонь експериментальних зразків представлено на рис. 3. Виявлено недоліки по за-

повненню перекриття зразка № 2, що зображено на рис. 3, г. Виявлено, що профілі бічних стінок зразків майже ідентичні, тому для прикладу наведено вигляд бічної стінки зразка № 1 (рис. 3, в). Зазначимо, що профілі верхніх та нижніх поверхонь зразків № 1 та № 6 не мають суттєвих недоліків по заповненню перекриттів.

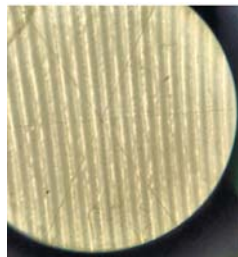
Для проведення досліджень, обробки отриманих даних і вста-



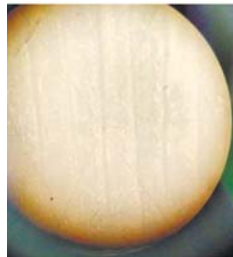
а



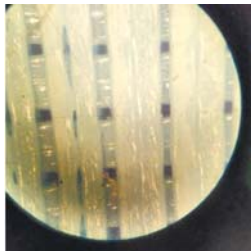
б



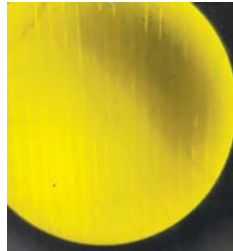
в



г

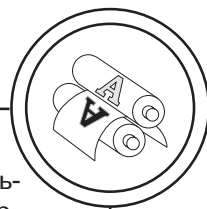


д



е

Рис. 3. Процес проведення досліджень структури поверхонь досліджуваних зразків: а — верхня поверхня зразка № 1, б — нижня поверхня зразка № 1, в — бічна стінка зразка № 1, г — нижня поверхня зразка № 2, д — верхня поверхня зразка № 2, е — верхня поверхня зразка № 6



новлення залежностей вихідних параметрів від вхідних сформовано план проведення експерименту, що передбачав формування вхідних даних для проведення експерименту у виді таблиці (табл. 3). Отримана база вимірів піддавалась аналітичним методам обробки із найбільш адаптованими режимами коригування отриманих вхідних величин, відповідно до методів та способів регресійного аналізу [12], що дозволило одночасне використання формульних та графічних залежностей вхідних величин відносно вихідних.

Для проведення розрахунків та аналізу експерименту і вхідних величин, що знаходяться в кодованій шкалі, здійснено перерахунків за формулою (3), яка для параметру товщини перекриття δ_1 буде мати вид:

$$x_1 = \frac{\delta_{1c} - \delta_1}{\delta_{1i}}, \quad (3)$$

де δ_1 — задане значення товщини перекриття в кодованій шкалі, δ_{1i} — отримане значення виміральної величини, δ_{1c} — серед-

нє значення діапазону обчислюється за формулою (4), δ_{1i} — інтервал вимірювань визначається за формулою (5).

Розраховано середнє значення діапазону та інтервал вимірювань вхідного параметру:

$$\begin{aligned} \delta_{1c} &= \frac{\delta_{1\min} - \delta_{1\max}}{2} = \\ &= \frac{0,5 + 3}{2} = 1,75, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \delta_{1i} &= \frac{\delta_{1\min} - \delta_{1\max}}{2} = \\ &= \frac{3 - 0,5}{2} = 1,25. \end{aligned} \quad (5)$$

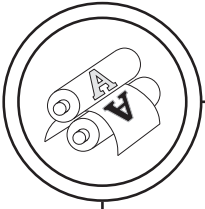
Дану методику застосовано для проведення розрахунків та інших вхідних параметрів (δ_2 , V) відповідно до формул (6–11), з яких формули (6–8) для представлення величин у кодованій шкалі для значень товщини бічної стінки поверхні виробу, а (9–11) для параметрів швидкості друкування:

$$x_2 = \frac{\delta_2 - \delta_{2c}}{\delta_{2i}}, \quad (6)$$

Таблиця 3

Планування експериментальних досліджень

№ експерименту (зразку)	Кодові значення коефіцієнту при невідомих							
	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_2 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$
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



$$\delta_{2c} = \frac{\delta_{2min} - \delta_{2max}}{2} = \frac{0,5 + 5}{2} = 2,75, \quad (7)$$

$$\delta_{2c} = \frac{\delta_{2min} - \delta_{2max}}{2} = \frac{5 - 0,5}{2} = 2,25, \quad (8)$$

$$V_3 = \frac{V_3 - V_{3c}}{V_{3i}}, \quad (9)$$

$$V_{3i} = \frac{V_{3max} - V_{3min}}{2} = \frac{60 + 30}{2} = 45, \quad (10)$$

$$V_{3i} = \frac{V_{3max} - V_{3min}}{2} = \frac{60 - 30}{2} = 15. \quad (11)$$

Проведено розрахунки коефіцієнтів залежності вхідних величин за лінійною залежністю рівняння регресії (12), а також за формулою (13):

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3, \quad (12)$$

де y — значення вхідної величини в кодованій шкалі, x_j — значення j -того коефіцієнта, a_i — коефіцієнт регресії, що обчислюється за формулою:

$$a_i = \frac{\sum_{i=0}^n x_i t_i}{n}, \quad (13)$$

де t_i — значення відповідного параметру за планом дослідження, що наведений вище в табл. 2

у виді технологічних параметрів, x_i — результат вимірювання i -того зразка, n — кількість дослідів.

Приведемо приклад розрахунку коефіцієнтів для визначення рівняння залежності шорсткості від вхідних параметрів за формулами (14–20):

$$a_0 = \frac{\sum_{i=0}^8 R_{a_i} x_{0i}}{8} = 8,16, \quad (14)$$

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^8 R_{a_i} x_{1i}}{8} = 1,84, \quad (15)$$

$$a_2 = \frac{\sum_{i=2}^8 R_{a_i} x_{2i}}{8} = -0,67, \quad (16)$$

$$a_3 = \frac{\sum_{i=3}^8 R_{a_i} x_{3i}}{8} = -3,62, \quad (17)$$

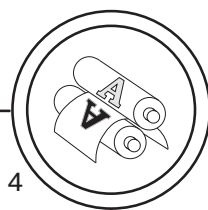
$$a_{12} = \frac{\sum_{i=12}^8 R_{a_i} x_{12i}}{8} = -1,75, \quad (18)$$

$$a_{23} = \frac{\sum_{i=23}^8 R_{a_i} x_{23i}}{8} = 1,71, \quad (19)$$

$$a_{13} = \frac{\sum_{i=13}^8 R_{a_i} x_{13i}}{8} = -1,93. \quad (20)$$

Здійснено опрацювання величин коефіцієнтів залежностей параметрів товщин внутрішніх стінок (δ_1) та товщини бічної стінки (δ_2) виробів. Отримані дані коефіцієнтів відповідно до математичної моделі представлено в табл. 4.

Розрахунки за формулою (12) дають можливість отримати значення коефіцієнтів у залежностях, описаних формулами (21–24):



Таблиця 4

Значення коефіцієнтів математичної моделі

Коефіцієнти величин	Значення коефіцієнтів (кодована шкала)						
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_{12}	a_{23}	a_{13}
k_{Ra}	8,16	1,84	-0,67	-3,62	-1,75	1,71	-1,93
k_{A1}	20,40	0,04	-0,07	-0,06	0,04	-0,03	0,04
k_{A2}	20,35	-0,01	0,03	-0,0037	-0,0037	0,04	-0,01
k_{A3}	20,07	-0,01	-0,01	-0,03	-0,03	0,02	-0,03

$$R_a = 8,16 + 1,84x_1 - 0,67x_2 - 3,62x_3 - 1,75x_1x_2 + 1,71x_1x_3 - 1,93x_2x_3, \quad (21)$$

$$A_1 = 20,40 + 0,105\delta_1 - 0,0889\delta_2 - 0,00299V + 0,0178\delta_1\delta_2 - 0,213\delta_1V + 0,0148\delta_2V, \quad (25)$$

$$A_1 = 20,40 + 0,04x_1 - 0,067x_2 - 0,06x_3 + 0,04x_1x_2 - 0,03x_1x_3 + 0,04x_2x_3, \quad (22)$$

$$A_2 = 20,6 - 0,197\delta_1 - 0,0199\delta_2 - 0,00176V + 0,00133\delta_1\delta_2 - 0,000533\delta_1V + 0,000889\delta_2V, \quad (26)$$

$$A_2 = 20,35 - 0,01x_1 + 0,03x_2 - 0,0037x_3 - 0,0037x_1x_2 - 0,04x_1x_3 - 0,01x_2x_3, \quad (23)$$

$$A_3 = 20,02 - 0,0693\delta_1 - 0,0258\delta_2 - 0,026V + 0,0107\delta_1\delta_2 - 0,00107\delta_1V + 0,000889\delta_2V, \quad (27)$$

$$A_3 = 20,07 - 0,01x_1 - 0,01x_2 - 0,003x_3 - 0,003x_1x_2 - 0,02x_1x_3 - 0,03x_2x_3. \quad (24)$$

$$R_a = 12,4 + 7,795\delta_1 - 1,49\delta_2 - 0,2V + 0,619\delta_1\delta_2 - 0,102\delta_1V + 0,05\delta_2V. \quad (28)$$

Детальний аналіз залежностей лінійних розмірів 3D виробів (22–24) дозволяє налаштувати оптимальні параметри друкарського обладнання. Дослідження отриманих залежностей вказує на те, що зі збільшенням параметру x_2 або товщини бічної стінки, як і параметру x_3 — швидкості друку, мають позитивний вплив на якість виробу.

Здійснено підстановку даних у формули (22–24) і перераховано вхідні значення в кодовану шкалу, отримано наступні залежності:

Із наведених залежностей (25–27) побудовані графіки, що характеризують залежності розмірів 3D виробів від товщини бічної стінки та товщини внутрішніх стінок, при сталій швидкості друку $V = 30$ мм/с (рис. 4, I) та при $V = 60$ мм/с (рис. 4, II).

Із наведених графіків видно, що при збільшенні товщини бічної стінки підвищується точність значення отриманого розміру 3D виробу. Порівняльний аналіз графіків залежності розмірів A_1 , A_2 та A_3 зі зміною швидкості друку,

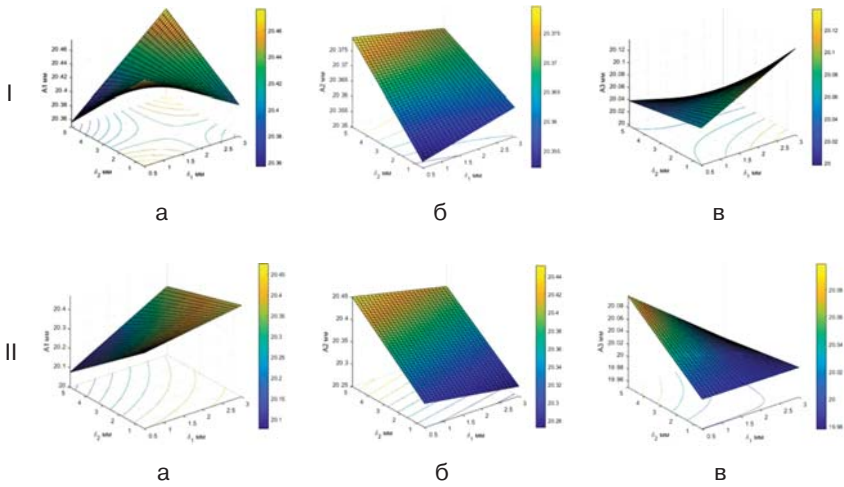


Рис. 4. Графіки залежностей розмірних характеристик A_1 (а), A_2 (б), A_3 (в) від товщини бічної стінки та товщини внутрішніх стінок 3D виробів при заданій швидкості друку (V): I — 30 мм/с, II — 60 мм/с

вказує на те, що існує пряма залежність розміру A_2 , що видно з рис. 4, б, I, II. Проаналізувавши отримані графіки рис. 4, I та II можна побачити, що при підви-

щенні швидкості друку підвищується точність розміру отриманого виробу.

Для дослідження даної закономірності побудовано графіки,

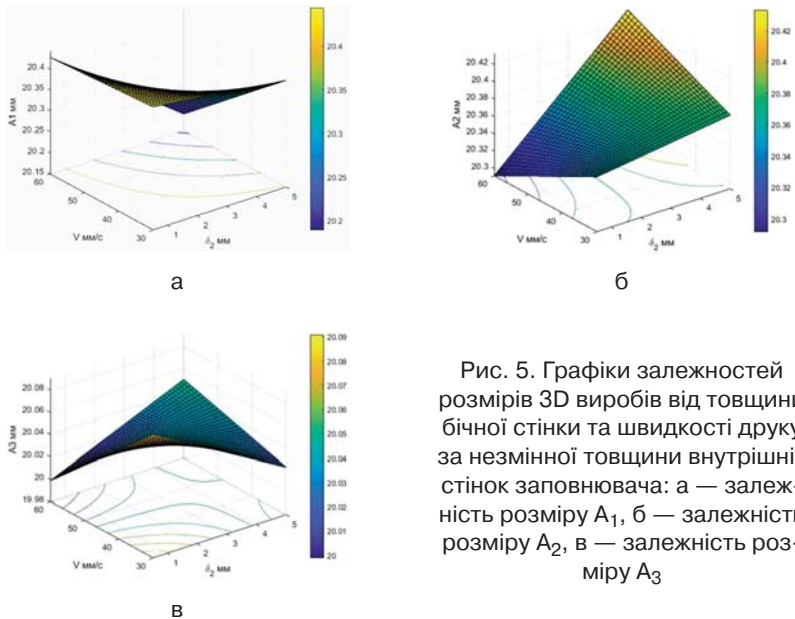
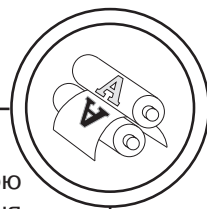


Рис. 5. Графіки залежностей розмірів 3D виробів від товщини бічної стінки та швидкості друку за незмінної товщини внутрішніх стінок заповнювача: а — залежність розміру A_1 , б — залежність розміру A_2 , в — залежність розміру A_3



що характеризують залежності розмірів 3D виробів від товщини бічної стінки та швидкості друку за незмінної товщини внутрішніх стінок заповнювача (рис. 5).

Із наведених графіків не прослідковується чітка кореляція між зміною товщини внутрішніх стінок заповнювача, товщиною бічної стінки та швидкістю друку, та отриманими розмірними характеристиками готових виробів.

Детальний аналіз величин, зазначених у формулах (25–27) вказує на те, що в результаті збільшення швидкості друку витратні матеріали, екструдовані на попередньому шарі, не встигають охо-

лонути та застигнути, що в свою чергу призводить до збільшення адгезії в самому шарі та між попереднім і наступним шаром. При збільшенні товщини бічної стінки і внутрішніх стінок заповнювача зменшується просідання витратного матеріалу, що позитивно впливає на зменшення провисань пластику, особливо, на перших суцільнозаповнених шарах 3D виробу. Параметрами, що призводять до втрати якості поверхні 3D виробів визначено товщину внутрішніх стінок заповнювача та поєднання параметрів швидкості друку та товщини бічної стінки. Експериментально підтверджено,

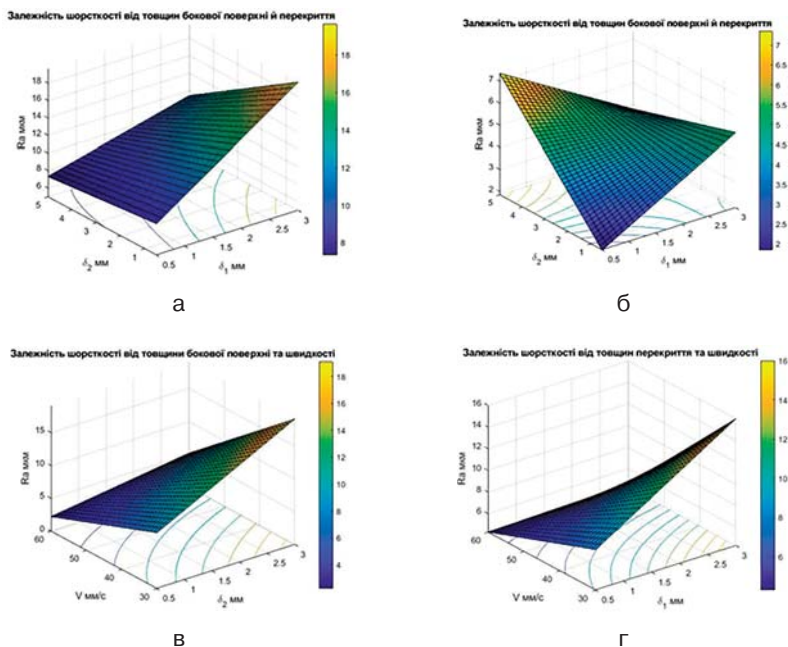
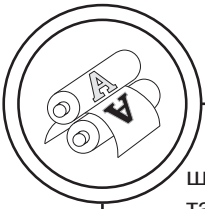


Рис. 6. Графіки формування шорсткості поверхневого шару залежно від технологічних параметрів: а — товщини бічної стінки та внутрішніх стінок заповнювача за швидкості 30 мм/с, б — товщини бічної стінки та внутрішніх стінок заповнювача за швидкості 60 мм/с, в — товщини бічної стінки та сталій швидкості за товщинивнутрішніх стінок заповнювача 1,5 мм, г — товщини бічної стінки та сталій швидкості за товщини внутрішніх стінок заповнювача 0,8 мм



що за швидкості друку 60 мм/с та за заданої товщини бічної стінки у 0,5 мм досягається найбільш однорідна поверхня 3D сувеніру.

Із наведеної регресійної моделі (28) побудовано графіки, що характеризують залежності технологічних параметрів друку формування виробу на шорсткість поверхневого шару виробів, отриманих із застосуванням адитивних технологій (рис. 6).

На отриманих графіках видно, що збільшення швидкості друку та підвищення параметрів товщини бічної стінки та внутрішніх стінок заповнювача, призводить до зменшення параметру шорсткості поверхні 3D виробів. Найоптимальніший результат шорсткості поверхні можна отримати при підвищенні швидкості друку до 60 мм/с та зменшенні товщини бічної стінки згідно графіку представленою на рис. 6, в. Немає

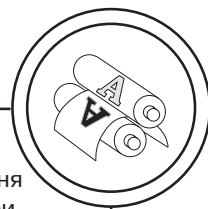
чіткої кореляції між товщиною внутрішніх стінок заповнювача та параметрами шорсткості поверхні.

Висновки

Результати проведених досліджень дають підстави стверджувати, що друкування зі швидкістю 60 мм/с призводить до зменшення параметру шорсткості поверхні виробу, що є бажаним результатом. Зміна товщини внутрішніх стінок заповнювача та товщини бічної поверхні не має чіткої кореляції ні з отриманими значеннями шорсткості поверхні виробу, ні із отриманими розмірними характеристиками. Спостерігається незначне збільшення розмірних характеристик кінцевого виробу у межах 0,05–2,35 % від запроєктованого розміру, що в подальшому доцільно враховувати на етапі моделювання.

Список використаної літератури

1. М. Ю. Володько. Адитивні технології виготовлення сувенірної продукції // М. Ю. Володько, Т. Є. Клименко, Н. Л. Талімонова // Технологія і техніка друкарства. 2022. № 4(78). С. 53–63. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(78\).2022.274952](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(78).2022.274952).
2. Mohamed O. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects / O. Mohamed, S. Masood, J. Bhowmik // Adv. Manuf. 2015. № 3. pp. 42–53. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>.
3. Яцишин С. Дослідження можливостей покращення якості виробів 3D-принтерної технології / С. Яцишин, І. Полянський // Вимірювальна техніка та метрологія: міжвідомчий науково-технічний збірник. Львів: Видавництво Львівської політехніки. 2017. № 78. С. 74–79.
4. Ranjan R. A critical review on Classification of materials used in 3D printing process/ Ranjan, R., Kumar, D., Kundu, M., Chandra Moi, S. // Materials Today: Proceedings. 2022. V. 61. Part 1. pp. 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.308>.
5. Shahrubudin N. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications / N. Shahrubudin, T. Lee, R. Ramlan // Procedia Manufacturing. 2019. 35. pp. 1286–1296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>.
6. Чонка Е. Я. Аналіз точності формування поверхонь деталей виготовлених на 3D принтері / Е. Я Чонка, В. С. Антонюк // Збірник праць XV Науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вче-



них «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні», 10–11 грудня 2019 року. К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. Центр учбової літератури. 2019. С. 197–200.

7. Яригін В. А. Методологія покращення характеристик міцності деталі, що виготовлена методом 3D друку // В. А. Яригін, С. П. Вислоух // Збірник наукових праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 6–9 листопада 2019 р. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка». С. 209–213.

8. 3D XYZprinting da Vinci 1.0 PRO. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.morele.net/drukarka-3d-xyzprinting-da-vinci-1-0-pro-3f1awxeu01k-1612193/>.

9. Технічні характеристики приладу для вимірювання шорсткості MarSurf PS 10 Mahr [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://metrology.mahr.com/ru/produkcija/article/6910235-mobiles-rauheitsmessgeraet-marsurf-ps-10-c2>.

10. Характеристики мікрометра МКУК-25 [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://microtech-ua.com/index.php?id_product=10143&controller=product&id_lang=3&search_query=Mikrometr+MKUC-25&results=270.

11. Опис мікроскопа типу Globisens Digiscope QX7 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.tehnoinstyle.com.ua/cifrovaya-laboratoriya/970-cifrovoy-kompyuternyj-mikroskop-globisens-digiscope-qx7.html>.

12. Літнарівич Р. М. Побудова і дослідження математичної моделі за джерелами експериментальних даних методами регресійного аналізу / Р. М. Літнарівич. Навчальний посібник. Рівне: МЕНУ, 2011. 140 с.

References

1. Volodko, M. Yu., Klymenko, T. Ye., & Talimonova, N. L. (2022). Adytyvni tekhnologii vyhotovlennia suvenirnoi produktsii [Additive Technologies of Souvenir Production]. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, 4(78), 53–63. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(78\).2022.274952](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(78).2022.274952) [in Ukrainian].

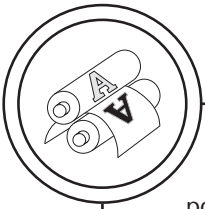
2. Mohamed, O., Masood, S., & Bhowmik, J. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Adv. Manuf.*, 3, 42–53. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>.

3. Yatsyshyn, S., & Polianskyi, I. (2017). Doslidzhennia mozhlyvosti pokrashchennia yakosti vyrobiv 3D-prynteranoi tekhnologii [Researching the possibilities of improving the quality of products of 3D-printer technology]. *Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia: mizhvidomchyi naukovo-tekhnichniy zbirnyk*, 78, 74–79 [in Ukrainian].

4. Ranjan, R., Kumar, D., Kundu, M., & Chandra Moi, S. (2022). A critical review on Classification of materials used in 3D printing process. *Materials Today: Proceedings*, V. 61, Part 1, 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.308>.

5. Shahrubudin, N., Lee, T., & Ramlan, R. (2019). An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing*, 35, 1286–1296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>.

6. Chonka, E. Ya., & Antoniuk, V. S. (10–11 December, 2019). Analiz tochnosti formuvannia poverkhon detalei vyhotovlenykh na 3D prynteri [Analysis of the accuracy of the formation of the surfaces of parts made on a 3D printer]. *Zbirnyk prats XV Naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh 'Efektyvnist inzhenernykh rishen u prylobuduvanni'*, 197–200 [in Ukrainian].



7. Yaryhin, V. A., & Vysloukh, S. P. (6–9 November, 2019). Metodolohiia pokrashchennia kharakterystyk mitsnosti detali, shcho vyhotovlena metodom 3D druku [Methodology for improving the strength characteristics of a part produced by 3D printing]. *Zbirnyk naukovykh prats X Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu 'Protsesy mekhanichnoi obrobky, verstaty ta instrument'*, 209–213 [in Ukrainian].

8. *3D XYZprinting da Vinci 1.0 PRO*. Retrieved from <https://www.morele.net/drukarka-3d-xyzprinting-da-vinci-1-0-pro-3f1awxeu01k-1612193/>.

9. *Tekhnichni kharakterystyky prykladu dlia vymiriuvannia shorstkosti MarSurf PS 10 Mahr*. Retrieved from <https://metrology.mahr.com/ru/produkcija/article/6910235-mobiles-rauheitsmessgeraet-marsurf-ps-10-c2>.

10. *Kharakterystyky mikrometra MKUK-25 [Characteristics of the MKUK-25 micrometer]*. Retrieved from https://microtech-ua.com/index.php?id_product=10143&controller=product&id_lang=3&search_query=Mikrometr+MKUC-25&results=270 [in Ukrainian].

11. *Opys mikroskopa typu Globisens Digiscope QX7*. Retrieved from <https://www.tehnoinstyle.com.ua/cifrovaya-laboratoriya/970-cifrovoj-kompyuternyj-mikroskop-globisens-digiscope-qx7.html>.

12. Litnarovych, R. M. (2011). *Pobudova i doslidzhennia matematychnoi modeli za dzherelamy eksperymentalnykh danykh metodamy rehresiinoho analizu [Construction and research of a mathematical model based on sources of experimental data by methods of regression analysis]*. Rivne: MEHU, 140 p. [in Ukrainian].

Experimental studies of the accuracy of reproduction of 3D products made by FDM printing technology were conducted. Mathematical dependencies of the surface quality indicators of 3D products on the technological parameters of their manufacturing process have been established.

Keywords: 3D printing; additive manufacturing; souvenir products; accuracy of reproduction of geometric parameters; surface roughness of 3D product.

Надійшла до редакції 19.01.23