

Оцінка впливу параметрів процесу Fused Deposition Modelling на пористість надрукованих деталей

Л. О. Тумарченко¹ • Є. В. Вишнепольський¹

Received: 2 September 2024 / Revised: 19 September 2024 / Accepted: 24 September 2024

Анотація. Моделювання методом наплавлення (FDM) – це технологія адитивного виробництва, яка швидко набирає популярність завдяки можливості виготовляти деталі складної форми за короткий час. Однак деталі, створені за допомогою FDM, мають пористість, яка виникає внаслідок процесу друку. Механічні властивості надрукованих деталей залежать від режимних параметрів процесу FDM та пористості. В дослідженні вивчається вплив режимних параметрів процесу FDM на пористість деталей, створених FDM. Результати дослідження показують, що правильно підібрані режимні параметри процесу FDM можуть зменшити пористість деталей. Встановлення впливу режимних параметрів процесу FDM на пористість виконано на основі аналізу дев'яти змінних параметрів процесу: висота шару, температура екструзії, швидкість друку, екструзійний множник, температура платформи, схема заповнення, ширина укладання нитки, кількість стінок, кількість суцільних верхніх і нижніх шарів. Вимірювання пористості зразків виконано на основі методу гідростатичного зважування. За допомогою дисперсійного аналізу встановлено статистично значущі фактори та їх комбінації, що впливають на пористість деталей. Встановлено, що на пористість деталей найбільший вплив має екструзійний множник. Суттєвий вплив на формування пористості має схема заповнення, висота шару, швидкість друку, кількість стінок, кількість суцільних верхніх та нижніх шарів та їх взаємодії. Отримана регресійна модель, дозволяє прогнозувати пористість деталей, яка досягається при різному поєднанні параметрів процесу FDM.

Ключові слова: Fused Deposition Modelling, гідростатичне зважування, параметри процесу, пористість, регресійна модель, дисперсійний аналіз.

Вступ

Моделювання методом наплавлення (FDM) належить до групи технологій адитивного виробництва (AM) на основі екструзії, де напіврідкий матеріал наноситься вздовж заданої траєкторії для створення багатопарового тривимірного об'єкта. Матеріал подається в екструдер, де плавиться і екструдуються через сопло. Екструдовані нитки з'єднуються за допомогою молекулярної дифузії при підвищеній температурі [1] і формують жорстку пористу структуру після охолодження. Однією з основних переваг методу FDM є велика гнучкість у виготовленні складних геометрій.

Крім того, AM на основі екструзії є економічно вигідним для малосерійного виробництва [2]. Спочатку такі деталі використовувалися переважно як прототипи та демонстраційні моделі, але завдяки постійному вдосконаленню процесу їх застосування значно розширилося, і тепер вони можуть бути використані як функціональні кінцеві продукти [3].

Попри значний успіх процесу FDM, ще залишається чимало проблем, які потрібно вирішити для підвищення його конкурентоспроможності. Загалом, деталі, виготовлені за допомогою FDM, мають меншу міцність на розрив порівняно з компонентами, створеними традиційними методами виробництва, такими як лиття під тиском [4]. Зменшення міцності пов'язане зі слабким зв'язком між шарами та присутністю пор у кінцевому продукті [5]. Пористість деталей, виготовлених методом FDM, є характерною проблемою для цього типу адитивного виробництва, і її слід вирішувати на стадії осадження матеріалу шляхом раціональ-

✉ Л. О. Тумарченко
hurina97@gmail.com

¹ Національний університет "Запорізька політехніка",
Запоріжжя, Україна

ного вибору параметрів процесу. Оскільки високі механічні властивості є ключовими для функціональних деталей, необхідно ретельно контролювати параметри друку, щоб забезпечити якісну адгезію між шарами. Це допоможе знизити пористість і, як результат, покращити механічні характеристики деталей, виготовлених методом FDM. Розуміння впливу параметрів процесу FDM на утворення порожнин є ключовим для підвищення механічної міцності деталей і для забезпечення можливості виготовлення компонентів з контрольованими властивостями [6].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Функціональні залежності між властивостями деталей і параметрами процесу FDM досліджувалися в багатьох експериментальних роботах [7]. У дослідженні [8] проаналізовано вплив параметрів процесу FDM на пористість деталей, виготовлених із сумішшю PLA/PBAT. Результати показали, що всі досліджені параметри процесу FDM (висота шару, швидкість друку та кут накладання нитки) і їх взаємодія мають статистично значущий вплив на пористість. Дослідники виявили, що використання нижчих значень параметрів (LT (висота шару) = 0,10 мм, DS (швидкість друку) = 40 мм/с і PD (кут накладання нитки) = 0°) дозволяє зменшити кількість пор у деталях (пористість менше 3 %).

Автори роботи [9] аналізували вплив діаметра сопла та заповнення на пористість і розмір пор FDM-друкованих зразків із прямолінійною сіткою. Вони встановили, що чим вище відсоток заповнення, тим менша пористість і розмір пор, а більший діаметр сопла передбачає більший розмір пор, але однакову пористість.

Chandrashekarappa et al. проводили дослідження впливу основних параметрів процесу FDM, такі як висота шару, товщина оболонки, щільність заповнення та швидкість друку на циліндричність (CE) та пористість надрукованих деталей [10]. Було встановлено, що щільність заповнення найбільше впливає на пористість. За допомогою алгоритмів BES і RAO-3 були визначені оптимальні умови (висота шару: 0,22 мм; товщина оболонки: 2 мм; щільність заповнення: 100 %; швидкість друку: 30 мм/с), що забезпечили експериментальні значення CE на рівні 0,1215 мм і 2,5 % пористості надрукованих деталей.

Abidin et al. [11] проводили дослідження для досягнення оптимальної пористості при друці кісткових каркасів з використанням PLA-матеріалу. Результати показали, що найбільший вплив на пористість кісткового каркаса мали такі фактори: температура сопла, висота шару і швидкість друку.

У дослідженні [12] кубічні деталі з PLA друкували методом FDM із використанням сітчастої структури та заповненням 40 %. Показники пористості варіювалися від 53,76 % до 72,33 %. Було встановлено,

що основними факторами, що впливають на пористість, є висота шару та швидкість друку.

Встановлення оптимального набору параметрів процесу FDM є необхідним кроком для досягнення заданих властивостей деталей. Згідно огляду літератури велика увага приділяється визначенню правильних змінних для досягнення бажаних властивостей у деталях, виготовлених методом FDM. Зокрема, найбільш досліджувальними параметрами є висота шару, швидкість друку, щільність заповнення, але на ефективність процесу та якість деталей впливає значна кількість (понад 10) параметрів процесу та не менш важливою є їх взаємодія. Не можна ігнорувати фактори взаємодії, оскільки вони забезпечують глибше розуміння процесу [13]. Фактори взаємодії мають важливе значення, оскільки вплив різних параметрів процесу FDM може змінюватися залежно від рівня інших змінних процесу, що впливають на якісні характеристики кінцевого результату. Тому, врахування всіх складових (основних факторів і їх взаємодії) надасть більш точну інформацію про процес і дозволить забезпечити кращі прогнози, ніж у випадку, коли фактори взаємодії залишаються поза увагою. Саме тому, метою цієї роботи є дослідження впливу параметрів процесу FDM (висота шару, швидкість друку, температура екструзії, температура платформи, схема заповнення, екструзійний множник, ширина укладання нитки, кількість стінок, кількість суцільних верхніх та нижніх шарів) та їх взаємодії на формування пористості деталей, отриманих методом FDM та встановлення оптимальних значень параметрів процесу для мінімізації пористості, що як наслідок, дозволить покращити механічні властивості деталей.

Матеріали та методи дослідження

Прямокутні зразки з розмірами 19,5 × 25,0 × 6,0 мм друкували методом FDM на 3D-принтері Elegoo Neptune 4. Використовували програмне забезпечення для підготовки G-коду – Slic3rPE. Розмір робочої зони 3D-принтера складав 225 × 225 × 265 мм. Система подачі – пряма; тип екструдера – одинарний; розмір сопла – 0,4 мм; максимальна температура екструдера – 300 °C; максимальна температура столу – 110 °C; максимальна швидкість друку – 500 мм/с.

Зразки виготовляли з матеріалу – ABS+ від компанії Monofilament. У таблиці 1 надані механічні характеристики матеріалу [14].

Дослідження пористості проводили методом гідростатичного зважування згідно ГОСТ 15139–69. Сутність методу полягає у порівнянні мас однакових об'єктів випробуваного матеріалу та рідини відомої густини (дистильованої води). Для зважування використовували ваги аналітичні з точністю зважування до 0,0001 г. Для зменшення можливості захоплення або включення повітряних бульбашок зразки покривали шаром парафіну відомої густини, що потім враховували при розрахунку

густини. Для того, щоб зразок не спливав в рідині, використовували додатковий вантаж. Після проведення всіх зважувань, щільність зразка розраховували за формулою:

$$\rho_3 = \frac{M_1 \cdot \rho_6 \cdot \rho_n}{(M_2 - (M_3 - M_4)) \cdot \rho_n - M_5 \cdot \rho_6}, \quad (1)$$

де M_1 – маса зразка без парафіну зваженого в повітрі; M_2 – маса зразка вкритого парафіном зваженого в повітрі; M_3 – маса зразка вкритого парафіном зваженого в рідині; M_4 – маса підвіски з вантажем зваженого в рідині; M_5 – маса парафіну; ρ_n – густина парафіну; ρ_6 – густина дистильованої води.

Таблиця 1. Механічні властивості матеріалу ABS+ (Monofilament) [14]

| Механічні властивості | ABS+ Monofilament |
|---|-------------------|
| Густина, г/см ³ | 1,05 |
| Температура експлуатації, °C | -20...+80 |
| Міцність на розтяг, МПа | 40 |
| Відносне видовження при розриві, % | 35 |
| Ударна в'язкість без надрізу по Шарпі (23 °C), кДж/м ² | 208 |
| Модуль пружності при розтягу, МПа | 2700 |
| Модуль пружності при згині, МПа | 2800 |
| Міцність при згині, МПа | 70–80 |
| Водопоглинання, % 24 ч/23 °C, % | 1 % |

Відсоток пористості зразків розраховували за формулою:

$$P = 100 - \frac{\rho_3}{\rho_m} \cdot 100, \quad (2)$$

де ρ_3 – щільність зразка; ρ_m – густина матеріалу.

Для статистичної обробки результатів використали програмний комплекс STATISTICA.

Результати дослідження та обговорення

Метою дослідження є визначення комплексного впливу параметрів процесу FDM на пористість деталей. Для мінімізації загальної кількості експериментів обрано дробний факторний експеримент 3^{9-5} . Для кожного параметра процесу було використано три рівні варіації (табл. 2). Як функцію відгуку вибрано залежну змінну: відсоток пористості зразка.

Після друку зразків відповідно до плану експерименту, було проведено зважування та розраховано за формулами значення функції відгуку (відсоток пористості) по кожному зразку. Відсоток пористості зразків варіювався від 4,40 % до 7,65 %.

Для визначення ступеня статистично обґрунтованого впливу режимних параметрів процесу на формування функції відгуку проведено дисперсійний аналіз на основі проведеного дробного факторного експерименту.

Для зображення ранжування чинників за їх відносним впливом та важливістю виконано аналіз за допомогою діаграми Парето (рис. 1).

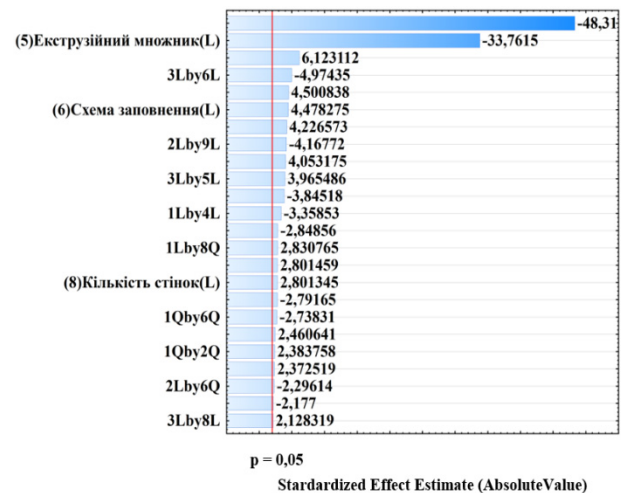


Рис. 1. Діаграма Парето впливу параметрів процесу FDM на пористість зразків

Діаграма Парето швидко та наочно показує параметри, які статистично впливають на досліджувану функцію відгуку, упорядковуючи фактори від найбільшого до найменшого за розміром стовпців. Якщо стовпець перетинає лінію p -рівня ($p = 0,05$), це означає, що параметр має вплив на досліджувану функцію відгуку (рис. 1). Скоригований коефіцієнт детермінації (R^2_{adj}) для пористості дорівнює 0,978, що вказує на те, що 97,80 % загальної варіації пористості можна пояснити емпіричними моделями, розробленими в цьому дослідженні. Скориговані значення R^2 добре узгоджуються з прогнозованим R^2 (98,50 %), що свідчить про сильну кореляцію між експериментальними та прогнозованими результатами.

За даними дисперсійного аналізу та діаграми Парето (рис. 1) встановлено, що найбільший вплив на ступінь пористості має екструзійний множник, як самостійний фактор впливу. Також, слід зазначити, що певний вплив на формування пористості зразків мають наступні параметри: схема заповнення, кількість стінок, швидкість друку, кількість суцільних нижніх та верхніх шарів та взаємодії: висота шару та екструзійний множник; швидкість друку та ширина укладання нитки; температура екструзії та схема заповнення; швидкість друку та кількість суцільних нижніх та верхніх шарів; температура екструзії та екструзійний множник; висота шару та кількість суцільних нижніх та верхніх шарів; висота шару та температура платформи; висота шару та кількість стінок; висота шару та схема

Таблиця 2. Обрані параметри процесу та їх рівні

| Параметр процесу FDM | | Рівень варіювання | | |
|----------------------|---|-------------------|--------------|----------------|
| | | - 1 | 0 | + 1 |
| 1 | Висота шару, мм | 0,1 | 0,2 | 0,3 |
| 2 | Швидкість друку, мм/с | 30 | 60 | 90 |
| 3 | Схема заповнення | прямолинійна | концентрична | крива Гілберта |
| 4 | Температура платформи, °C | 90 | 100 | 110 |
| 5 | Ширина укладення нитки, мм | 0,4 | 0,5 | 0,6 |
| 6 | Кількість стінок | 2 | 4 | 6 |
| 7 | Кількість суцільних верхніх та нижніх шарів | 2 | 4 | 6 |
| 8 | Температура екструзії, °C | 225 | 235 | 245 |
| 9 | Екструзійний множник | 0,8 | 0,9 | 1 |

заповнення; висота шару та швидкість друку; швидкість друку та схема заповнення; температура екструзії та кількість стінок.

На основі даних експериментальних досліджень та їх статистичної обробки побудовані графічні залежності, які показують самостійний вплив значимих параметрів процесу FDM на формування пористості зразків (рис. 2–7).

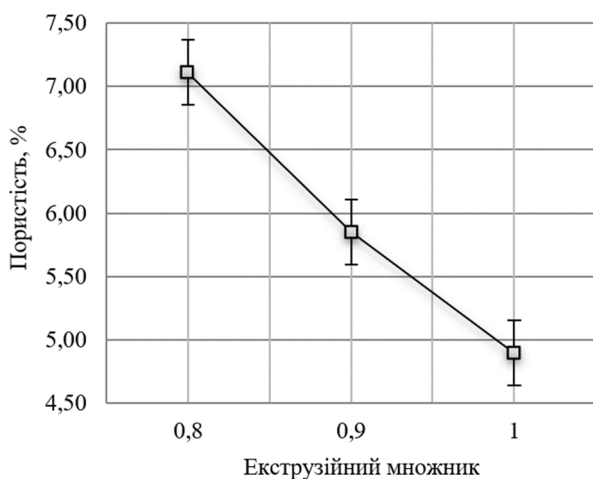


Рис. 2. Залежність пористості від екструзійного множника

На рис. 2 показано вплив екструзійного множника на пористість зразків. Параметр “екструзійний множник” або швидкість потоку впливає на кількість матеріалу, видавленого в одиницю довжини пройденого екструдером із заданою швидкістю. Однак швидкість потоку, може бути досить різною через різну реологічну поведінку різних матеріалів. Якщо встановити

цей показник вище 1, це дозволить зменшити пористість деталей та створювати більш щільні зразки, але занадто високі значення можуть спричинити переповнення матеріалу визначеної форми друкованого елемента, що призводить до зниження точності розмірів. У протилежному випадку, при екструзійному множителі < 1, отриманий зразок створюється з меншою, ніж оптимальною кількістю нитки, що призводить до меншої поверхні контакту між сусідніми нитками та погіршення склеювання шарів, через що пористість зразків зростає.

Рис. 3 демонструє залежність пористості зразків від висоти шару. В цій роботі менша пористість досягалась при встановленні висоти шару, яке дорівнює 0,2 мм. В залежності від висоти шару екструдована нитка змінює свою форму від овальної (для великої висоти шару) до кубічної із закругленими кутами (для малої висоти шару) [2].

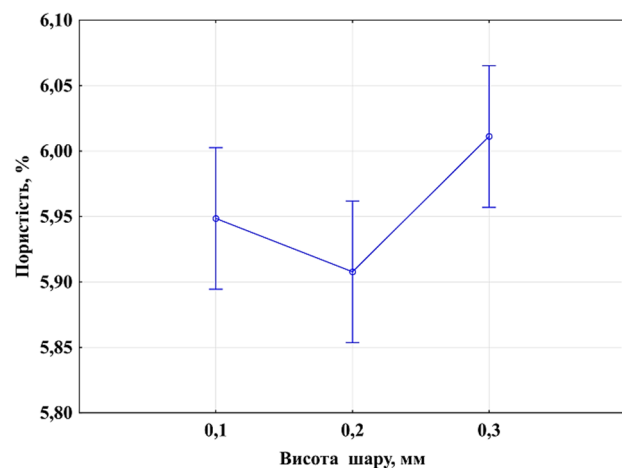


Рис. 3. Залежність пористості від висоти шару

Саме тому, менша висота шару забезпечує більшу площу контакту між екструдованими нитками через їх форму та зменшує розмір пор, але, з іншого боку, зменшення висоти шару призводить до збільшення кількості шарів необхідних для створення тієї самої деталі, що у свою чергу призводить до збільшення кількості пор. Виходячи з зазначеного вище і результатами, отриманими в цьому дослідженні, можна зробити висновок, що для мінімізації пористості деталей доцільно використовувати середнє значення висоти шару (0,2 мм).

Залежності пористості деталей від швидкості друку та схеми заповнення наведено на рис. 4–5.

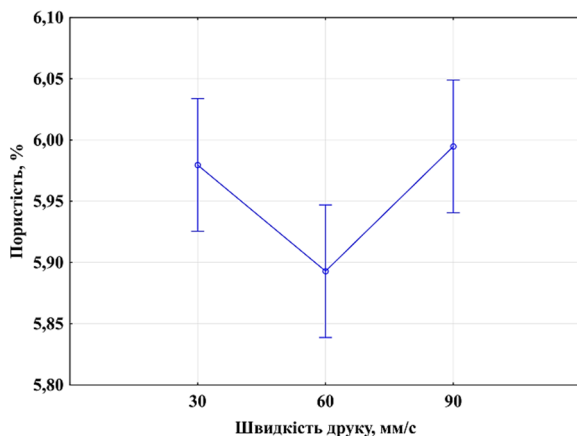


Рис. 4. Залежність пористості від швидкості друку

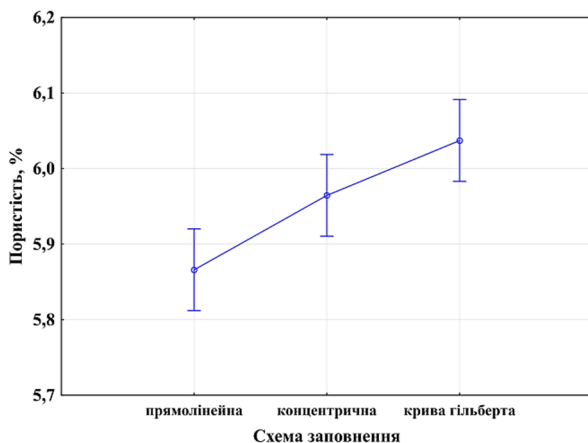


Рис. 5. Залежність пористості від схеми заповнення

Швидкість друку має неоднозначний вплив на пористість зразків (рис. 4), так як швидкість друку впливає на теплову історію екструдованих ниток. З одного боку, чим більша швидкість друку, тим швидше надрукується наступний шар і тим менше підшару охолоне до нанесення нового шару [15]. У цьому сенсі збільшення швидкості друку може мати аналогічний вплив на зменшення інтенсивності охолодження і, таким чином, сприятиме кращій дифузії між шарами, що

може забезпечити зменшення пористості. Але, з іншого боку, при вищій швидкості друку з'являється імовірність появи вібрацій та помилок, які можуть привести до збільшення пористості деталей. З іншого боку, менша швидкість друку дає більше часу для кращої адгезії та ущільнення нанесених шарів під час процесу друку, що означає, що матеріал, видавлений із сопла, краще розподіляється між просторами, заповнює порожнечі, роблячи деталь щільнішою. Враховуючи вище обговорене, що пояснює результати отримані в цьому дослідженні, нижчий відсоток пористості можна забезпечити встановлюючи середнє значення швидкості друку, а саме 60 мм/с.

Згідно графіка залежності пористості від схеми заповнення (рис. 5), можна зробити висновок, що чим складнішою є схема, тим більша пористість зразків отримана. Це пояснюється тим, що, наприклад, при використанні схеми "крива Гільберта", збільшується імовірність появи вібрації, через складну траєкторію руху друкуючої голівки, та виникнення помилок в процесі друку, що призводить до збільшення пористості. Тому, для мінімізації пористості деталей, встановлено, що доцільним буде використання прямолінійної схеми заповнення.

На рис. 6–7 зображено залежності пористості від кількості стінок та кількості суцільних нижніх і верхніх шарів. Встановлено, що менша кількість стінок забезпечує менший відсоток пористості зразків (рис. 6), що було очікуваним, так як більша кількість стінок сприяє формуванню більшої кількості порожнеч між шарами і через це загалом підвищує відсоток пористості. Підвищення кількості суцільних верхніх та нижніх шарів призводить до мінімізації відсотка пористості зразків (рис. 7). Слід зазначити, що суцільні шари в цьому експерименті друкувались прямолінійною схемою заповнення, яка, як зазначалось вище (рис. 5), забезпечує меншу пористість зразків. Саме тому, чим більше таких шарів присутні в зразках, тим меншу пористість буде досягнуто.

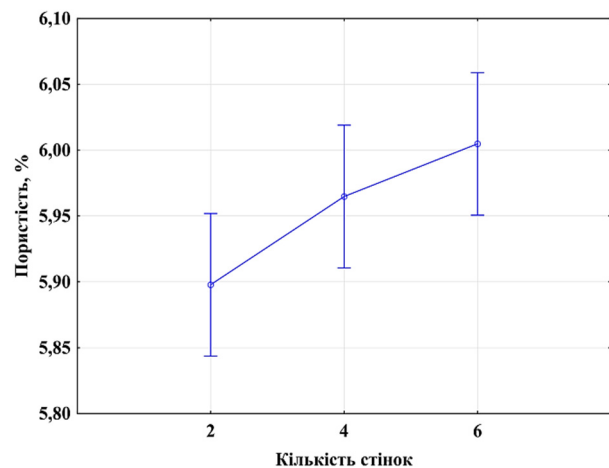


Рис. 6. Залежність пористості від кількості стінок

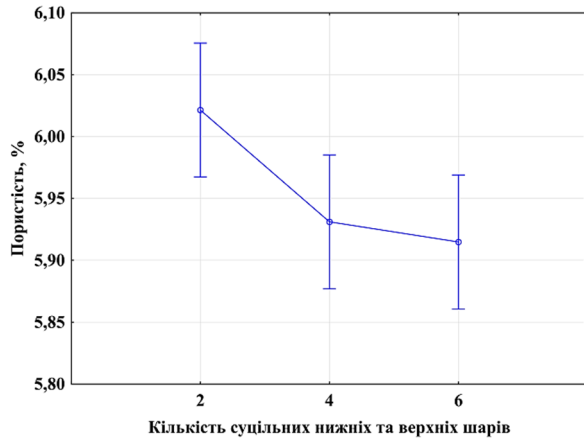


Рис. 7. Залежність пористості від кількості суцільних нижніх і верхніх шарів

Взаємодія розглянутих вище факторів, які за даними дисперсійного аналізу, мають вплив на формування пористості деталей, корелює з висновками зробленими для самостійних впливів цих факторів. Слід детально розглянути вплив комбінації факторів, які ще не згадувались та вносять значний вплив на функцію відгуку (рис. 8–10). На основі статистичного аналізу експериментальних даних встановлено, що взаємодія прямолінійної схеми заповнення та температури екструзії, яка дорівнює 225 °С, забезпечує меншу пористість зразків. Але, якщо обирати іншу схему заповнення, що може бути необхідним для певних геометрій деталей або певних механічних властивостей, то для концентричної схеми доцільно встановлювати температуру екструзії - 235 °С, а для кривої Гілберта - 245 °С (рис. 8).

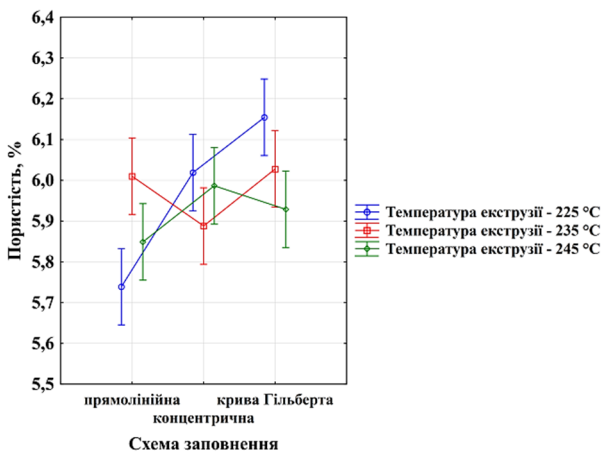


Рис. 8. Залежність пористості від взаємодії схеми заповнення та температури екструзії

Визначено, що для кількості стінок “4” та “6” зміна температури екструзії не має значного впливу на зменшення пористості деталі, тоді як при встановленні кількості стінок “2”, що, як встановлено в цій роботі, буде забезпечувати мінімізацію пористості, підвищення температури екструзії дозволяє отримати нижчий

показник пористості (рис. 9). Це пояснюється тим, що підвищення температури екструзії в дозволених межах підвищує плинність матеріалу і сприяє кращій дифузії шарів, що дозволяє мінімізувати пористість деталей.

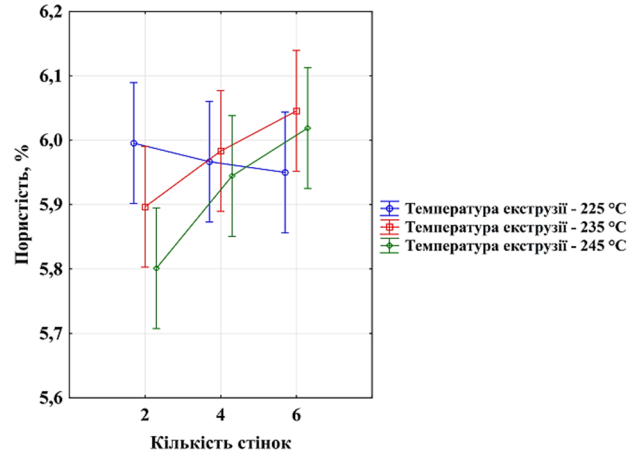


Рис. 9. Залежність пористості від взаємодії кількості стінок та температури екструзії

За графіком залежності пористості від взаємодії ширини укладання нитки та швидкості друку (рис. 10) можна зробити висновок, що для нижчих швидкостей друку (30 та 60 мм/с) доцільно встановлювати ширину укладання нитки, яка дорівнює 0,5 або 0,6 мм, тоді як при швидкості друку 90 мм/с кращі результати пористості були отримані при 0,4 мм ширини укладання нитки.

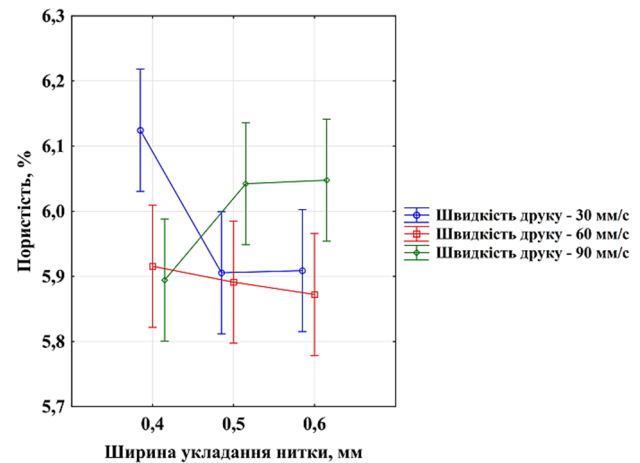


Рис. 10. Залежність пористості від взаємодії ширини укладання нитки та швидкості друку

Для розробки математичної моделі, яка дозволяє прогнозувати ступінь пористості при різних комбінаціях параметрів процесу, було проведено регресійний аналіз. На основі визначених коефіцієнтів регресії було створено рівняння регресії, яке дозволяє прогнозувати ступінь пористості при різних комбінаціях параметрів процесу FDM:

$$\begin{aligned}
 \text{Porosity} = & 4,855 + 1,599 \cdot \text{EM} \cdot \text{EM} - 0,570 \cdot \text{EM} + \\
 & 0,172 \cdot \text{LH} \cdot \text{LH} \cdot \text{PS} \cdot \text{PS} - 0,157 \cdot \text{NSL} + 0,156 \cdot \text{LH} \cdot \\
 & \text{LH} \cdot \text{NSL} - 0,112 \cdot \text{LH} \cdot \text{LH} \cdot \text{EM} + 0,098 \cdot \text{PS} \cdot \text{DSW} + \\
 & 0,093 \cdot \text{PS} \cdot \text{EM} - 0,093 \cdot \text{PS} \cdot \text{IP} + 0,085 \cdot \text{IP} - 0,077 \cdot \\
 & \text{LH} \cdot \text{BT} - 0,076 \cdot \text{LH} \cdot \text{LH} \cdot \text{IP} \cdot \text{IP} - 0,075 \cdot \text{LH} \cdot \text{EM} \cdot \\
 & \text{EM} + 0,069 \cdot \text{LH} \cdot \text{EM} - 0,058 \cdot \text{PS} \cdot \text{EM} \cdot \text{EM} + \\
 & 0,053 \cdot \text{NS} + 0,051 \cdot \text{ET} \cdot \text{NS} + 0,039 \cdot \text{PS} \cdot \text{IP} \cdot \text{IP} + \\
 & 0,035 \cdot \text{LH} \cdot \text{NSL} \cdot \text{NSL} - 0,035 \cdot \text{PS} \cdot \text{NSL} - 0,021 \cdot \\
 & \text{PS} \cdot \text{PS} + 0,019 \cdot \text{LH} \cdot \text{NS} \cdot \text{NS} + 0,008 \cdot \text{LH} \cdot \text{LH}, \quad (4)
 \end{aligned}$$

де LH – висота шару; PS – швидкість друку; EM – екструзійний множник; IP – схема заповнення; NS – кількість стінок; NSL – кількість суцільних верхніх і нижніх шарів; BT – температура платформи; DSW – ширина укладання нитки; ET – температура екструзії.

Адекватність отриманого рівняння регресії перевіряли на основі графіка відповідності прогнозованих значень спостережуваним значенням (рис. 11).

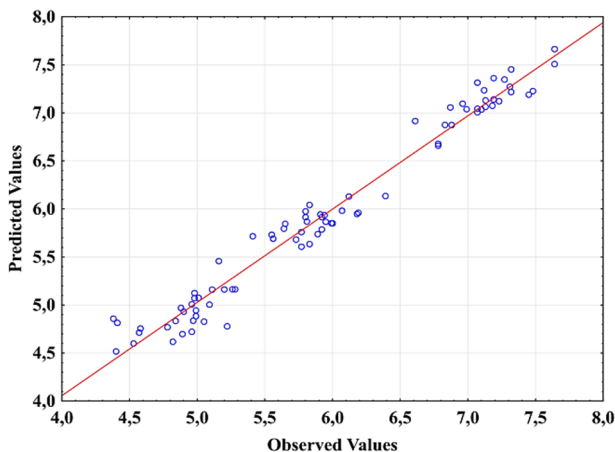


Рис. 11. Відповідність передбачуваних значень спостережуваним значенням

Передбачувані значення (рис. 11) не мають високої розбіжності зі значеннями отриманими експериментально, відповідно отримана модель з точки зору статистичної обробки має достатню адекватність та її можна використовувати для прогнозування величини ступені пористості залежно від того чи іншого поєднання параметрів процесу FDM.

Висновки

У цій роботі використовувалось планування експерименту для дослідження впливу налаштувань параметрів процесу FDM на пористість деталей, виготовле-

них за допомогою FDM з використанням ABS+ філаменту. Проаналізованими змінними параметрами процесу FDM були висота шару, температура екструзії, швидкість друку, екструзійний множник, температура платформи, схема заповнення, ширина укладання нитки, кількість стінок, кількість суцільних верхніх і нижніх шарів. Кожній із цих змінних було призначено три рівня варіації для тестування, щоб визначити їх вплив та вплив взаємодії цих параметрів на пористість деталей. Пористість визначали за допомогою методу гідростатичного зважування. Результати випробувань були передані дисперсійному аналізу для визначення впливу кожного змінного параметру процесу FDM та їх взаємодій.

Встановлено, що найбільший вплив на ступінь пористості має екструзійний множник, як самостійний фактор впливу. Також, слід зазначити, що певний вплив на формування пористості зразків мають наступні параметри: схема заповнення, кількість стінок, швидкість друку, кількість суцільних нижніх та верхніх шарів, висота шару та взаємодії: висота шару та екструзійний множник; швидкість друку та ширина укладання нитки; температура екструзії та схема заповнення; швидкість друку та кількість суцільних нижніх та верхніх шарів; температура екструзії та екструзійний множник; висота шару та кількість суцільних нижніх та верхніх шарів; висота шару та температура платформи; висота шару та кількість стінок; висота шару та схема заповнення; висота шару та швидкість друку; швидкість друку та схема заповнення; температура екструзії та кількість стінок.

Аналіз результатів експерименту дав змогу зрозуміти значення оптимальних параметрів процесу для мінімізації пористості деталей, виготовлених методом FDM. В цій роботі встановлено, що мінімізації значення пористості (до 4,40 %) можна досягнути при наступних налаштуваннях параметрів процесу FDM: висота шару - 0,2 мм, швидкість друку - 60 мм/с, екструзійний множник - 1, схема заповнення - прямолінійна, кількість стінок - 2, кількість суцільних верхніх і нижніх шарів - 6.

На основі регресійного аналізу було отримано рівняння регресії, яке дозволяє прогнозувати ступінь пористості при різних комбінаціях параметрів процесу FDM. Адекватність отриманого рівняння регресії перевіряли на основі графіка відповідності прогнозованих значень спостережуваним значенням.

Загалом, результати отримані в цьому дослідженні показують складну взаємодію параметрів FDM-процесу і вказують на те, що для досягнення мінімальних значень пористості деталей є необхідність ретельної їх оптимізації.

References

- [1] Q. Sun, G. M. Rizvi, C. T. Bellehumeur and P. Gu, “Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 14, no. 2, pp. 72–80, Mar. 2008, doi: 10.1108/13552540810862028.
- [2] M. P. Serdeczny, R. Comminal, D. B. Pedersen and J. Spangenberg, “Numerical prediction of the porosity of parts fabricated with fused deposition modeling: 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF Symp 2018)”, in *Proc. of the Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 1849–1854, 2018.
- [3] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen and D. Hui, “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, pp. 172–196, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- [4] O. A. Mohamed, S. H. Masood and J. L. Bhowmik, “Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects,” *Adv. Manuf.*, vol. 3, no. 1, pp. 42–53, Mar. 2015, doi: 10.1007/s40436-014-0097-7.
- [5] C. Ziemian, M. Sharma and S. Zieme, Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling”, in *Mechanical Engineering*, InTech, 2012, doi: 10.5772/34233.
- [6] L. Li, Q. Sun, C. Bellehumeur and P. Gu, “Composite Modeling and Analysis for Fabrication of FDM Prototypes with Locally Controlled Properties”, *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 4, no. 2, pp. 129–141, Jan. 2002, doi: 10.1016/S1526-6125(02)70139-4.
- [7] A. Dey and N. Yodo, “A systematic survey of fdm process parameter optimization and their influence on part characteristics,” *JMMP*, vol. 3, no. 3, p. 64, Jul. 2019, doi: 10.3390/jmmp3030064.
- [8] P. H. M. Cardoso, R. R. T. P. Coutinho, F. R. Drummond, M. D. N. Da Conceição and R. M. D. S. M. Thiré, “Evaluation of printing parameters on porosity and mechanical properties of 3d printed pla/pbat blend parts”, *Macromolecular Symposia*, vol. 394, no. 1, p. 2000157, Dec. 2020, doi: 10.1002/masy.202000157.
- [9] S. Adanur and A. Jayswal. “Additive manufacturing of interlaced fibrous structures”, *Rapid Prototyp J*, vol.27, pp. 671–681, Mar. 2021, doi:10.1108/RPJ-05-2020-0095.
- [10] M. P. G. Chandrashekarappa et al., “Analysis and Optimization of Dimensional Accuracy and Porosity of High Impact Polystyrene Material Printed by FDM Process: PSO, JAYA, Rao, and Bald Eagle Search Algorithms”, *Materials*, vol. 14, no. 23, p. 7479, Dec. 2021, doi: 10.3390/ma14237479.
- [11] Z. Abidin et al., “Optimization of fdm 3d printing process parameter for improving porosity accuracy of pla scaffold”, *Palem-bang*, Indonesia, 2021. doi: 10.2991/ahe.k.210205.028.
- [12] I. Buj-Corral, A. Bagheri and M. Sivatte-Adroer, “Effect of Printing Parameters on Dimensional Error, Surface Roughness and Porosity of FFF Printed Parts with Grid Structure,” *Polymers*, vol. 13, no. 8, p. 1213, Apr. 2021, doi: 10.3390/polym13081213.
- [13] M. Patel G.C., P. Krishna and M. B. Parappagoudar, “Squeeze casting process modeling by a conventional statistical regression analysis approach,” *Applied Mathematical Modelling*, vol. 40, no. 15–16, pp. 6869–6888, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.apm.2016.02.029.
- [14] Properties ABS+ MonoFilament. Available at: <https://monofilament.com.ua/ua/products/standartnye-materialy/abs-plus/abs-plus-bezhevyy>
- [15] L. Hurina, Y. Vyshnepolskyi, D. Pavlenko and D. Stepanov, “Investigation of the Printing Parameters Influence on the Bond Lines Length in Fused Filament Fabrication”, in *2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*, Sumy, Ukraine: IEEE, Nov. 2020, pp. 02SAMA07-1-02SAMA07-5. doi: 10.1109/NAP51477.2020.9309668.

Evaluation of Fused Deposition Modelling process parameters influence on the porosity of printed parts

L. Tumarchenko¹ • Y. Vyshnepolskyi¹

¹ National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine

Abstract. Fused Deposition Modelling (FDM) is an additive manufacturing technology that is rapidly gaining popularity due to its ability to produce complex shaped parts in a short time. However, parts produced by means of FDM have porosity that results from the printing process. The mechanical properties of printed parts depend on the FDM process parameters and porosity. This study investigates the effect of FDM process parameters on the porosity of FDM parts. The results of the study show that properly selected FDM process parameters can significantly minimize the percentage of part porosity. The effect of FDM process parameters on porosity was determined by analyzing nine process variables: layer height, extrusion temperature, printing speed, extrusion multiplier, bed temperature, infill pattern, deposited strand width, number of shells, number of solid top and bottom layers. The percentage of samples porosity was measured by means of the hydrostatic weighing method. Using the analysis of variance, statistically significant factors and their combinations affecting the percentage of parts porosity were determined. It was shown that the extrusion multiplier had the greatest influence on the percentage of parts porosity. A significant contribution to the formation of porosity was made by the infill pattern, layer heights, printing speed, number of shells, number of solid top and bottom layers and their interaction. A regression model has been developed that allows predicting the porosity of parts achieved by different combinations of FDM process parameters.

Keywords: *Fused Deposition Modelling, hydrostatic weighing, process parameters, porosity, regression model, analysis of variance.*