

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В МЕТАЛУРГІЇ ТА МАШИНОБУДУВАННІ

MODELING OF PROCESSES IN METALLURGY AND MECHANICAL ENGINEERING

УДК 62-9

Тумарченко Л. О. аспірантка кафедри технології машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна e-mail: hurina97@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7973-7475

Вишнепольський Є. В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: evishnepolskiy@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8048-7976

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ДЕТАЛЕЙ З NYLON ОТРИМАНИХ МОДЕЛЮВАННЯМ МЕТОДОМ НАПЛАВЛЕННЯ

Мета роботи. Комплексне дослідження впливу режимних параметрів процесу Моделювання Методом Наплавлення - Fused Deposition Modeling (FDM) на шорсткість поверхонь деталей.

Методи дослідження. Зразки для дослідження друкували методом FDM на 3D-принтері моделі Profi+. Використовували програмне забезпечення для нарізки CAD-моделі на шари та підготовки G-коду – Slic3rPE. Зразки друкували філаментом Nylon від компанії Plexiwire. Просушування матеріалу безпосередньо перед друком проводили у електронній печі «ЕЛЕКТРОТЕРМ». Для визначення шорсткості зразків використовували профілометр 171621. Для статистичної обробки результатів використали програмний комплекс STATISTICA

Отримані результати. Досліджено вплив режимних параметрів друку FDM на шорсткість поверхонь деталей. Встановлено, що на шорсткість поверхні найбільше впливають одночасно декілька параметрів: швидкість друку, температура платформи, висота шару, щільність заповнення, екструзійний множник, кількість стінок, кількість суцільних верхніх та нижніх шарів, схема заповнення та температура екструзії.

Наукова новизна. Визначено раціональне поєднання режимних параметрів, при яких досягається мінімальна шорсткість поверхні. Таким чином було встановлено, що мінімальній шорсткості у досліджуваному діапазоні можна досягти при наступних режимних параметрах: схема заповнення – прямолінійна, густина заповнення 25 %, екструзійний множник 0,9, температура екструдера 265 °C, швидкість друку 40 мм/с, висота шару 0,15 мм, кількість суцільних стінок 2, температури платформи 100 °C. При збільшенні температури платформи і швидкості друку значення шорсткості буде збільшуватись, також до цього призводить збільшення висоти шару і щільності заповнення. Підвищення значення екструзійного множника та зменшення температури екструдера – має негативний вплив на шорсткість поверхні. Інші досліджувані параметри не мали статистично значущого впливу на шорсткість поверхні.

Практична цінність. Результати дослідження дозволяють прогнозувати та підвищувати якість деталей з нейлону, виготовлених методом FDM, за рахунок встановлення раціональних режимів процесу.

Ключові слова: Моделювання Методом Наплавлення, шорсткість поверхні, режимні параметри, нейлон, дисперсійний аналіз, якість поверхні.

Вступ

За останнє десятиліття адитивні технології поступово еволюціонували від технологій створення прототипів до альтернативи субтрактивному виробництву. Адитивні технології (АТ) отримали значну увагу в академічній та промисловій сферах, оскільки вони забезпечують можливість виготовляти деталі зі складною структурою без використання дорогих інструментів [1]. Зокрема, завдяки швидкості, простоті використання, легкості та економічній вигоді, моделювання методом наплавлення (FDM) стало найпоширенішим

методом 3D-друку для термопластичних матеріалів [2, 3].

З ростом технологій 3D-друку для виробництва полімерних деталей виникає проблема вибору між литтям під тиском і 3D-друком. Проте існують параметри, які можуть спростити цей вибір, такі як механічні властивості, кількість деталей, геометрична складність, розмірна точність, вартість і шорсткість поверхні. Деталі отримані литтям зазвичай мають вищі механічні властивості та ізотропність, і через дорожнечу обладнання, вони частіше використовуються для високих обсягів [4]. З іншого боку, виробництво деталей зі

складною геометрією та невеликими розмірами за низькою ціною можливе тільки завдяки 3D-друку. Метод FDM є простою технологією, нитка екструдуються через друкуючу головку та наноситься шар за шаром на будівельну платформу, формуючи об'єкт [5, 6]. Лиття під тиском, як метод виробництва полімерів, має свої обмеження, такі як обмеження конструкції деталей, висока початкова вартість обладнання та складність процесу [7].

Зазвичай для FDM використовують нитки з термопластичних полімерів, таких як ABS, PLA, PC і інші [5]. Є багатий вибір полімерів, але інженерні матеріали для FDM все ще обмежені, мають високу вартість та недостатню досліджену властивість, що ускладнює їх використання для виробництва. Поліамід (PA або нейлон) є одним з найважливіших класів інженерних термопластичних полімерів з чудовими характеристиками. Проте, дослідження показали, що вироби з чистого ПА, виготовлені методом FDM, мають серйозні деформації та нестабільність. Причина цього полягає у накопиченні напруги усадки, що виникає під час кристалізації полімерів [8]. Для запобігання викривленню важливо перешкоджати регулярному розташуванню молекулярних ланцюгів і послаблювати їх здатність до кристалізації [9, 10]. Якість 3D-друківаних деталей може бути налаштована за допомогою параметрів друку.

Використання нових матеріалів з відповідними властивостями сприяє пошуку раціональних параметрів друку методом FDM. Хоча в галузі FDM було проведено багато досліджень, нейлон досі не отримав належної уваги. Завдяки своїм унікальним властивостям він може знайти широке застосування в промисловості [11]. Попередньо нейлон використовувався переважно у текстильній промисловості, але зараз його властивості дозволяють його використовувати у виробництві деталей для автомобільної промисловості, таких як шестерні, підшипники та ін., оскільки він має самозмащувальні властивості, високу стійкість до зношування та термічну міцність. Крім того, нейлон легший за сталь на 15 % і алюміній на 40 % [4].

Аналіз досліджень та публікацій

Останні дослідження полімерних матеріалів, таких як ABS, PLA, виготовлених за допомогою FDM, розширили можливості їх застосування. Проте зміна параметрів друку для отримання бажаних властивостей продовжує залишатися об'єктом досліджень. Додатково, продукти, створені за допомогою FDM, часто мають недостатню міцність та адгезію через порожечі, викликані неповною дифузією між шарами, що вимагає подальших досліджень для знаходження оптимальних параметрів.

Деякі дослідження було спрямовано на вивчення впливу параметрів процесу на результати друку FDM для нейлону. Li et al. досліджували властивості ПА 12, зокрема його реологічні характеристики, якість зчеплення та механічні властивості в контексті застосування у FDM [12]. Вони виявили, що при підвищенні

температури екструзії в'язкість розплавленого ПА 12 зменшується, що сприяє покращенню якості зчеплення. Це призвело до отримання практично щільних деталей ПА 12 з міцністю на розрив до 58,88 МПа. Liao et al. розробили композитні нитки вуглецеве волокно/ПА 12, що дозволило досягти межі міцності на розрив до 93,8 МПа [1].

В роботі Vishwas M. прийшли до висновку що кут орієнтації та товщина оболонки є параметрами процесу, які найбільше впливають на механічні властивості ABS та нейлону [13]. У випадку нейлону межа міцності на розрив є максимальною для товщини шару 0,1 мм, кута орієнтації 300° і товщини оболонки 1,2 мм. Для точності розмірів товщина шару 0,3 мм, кут орієнтації 150° і товщина оболонки 0,4 мм.

У дослідженні [4] зразок нейлону 12 використовувався для проведення випробувань на розтягування з метою вивчення впливу різних факторів, таких як відсоток заповнення, товщина шару, кількість контурів та їх взаємодія, на механічні властивості, час виготовлення та вагу деталі за допомогою методу планування експерименту (DOE). Аналіз показав, що товщина шару та кількість контурів значно впливають на час виготовлення. Кількість контурів та щільність заповнення також мають великий вплив на механічні властивості та час виготовлення. Збільшення кількості контурів призводить до підвищення ваги деталі та покращення механічних властивостей, але одночасно збільшує час виробництва. Експериментальні результати показали, що максимальні значення навантаження на розрив (533 Н) і подовження (595,5 %) отримані при товщині шару від 0,2 до 0,3 мм. Зменшення товщини шару при тій самій швидкості друку призвело до збільшення швидкості охолодження, що значно підвищило міцність та зменшило подовження. Товщина шару також впливала на час друку.

У дослідженні [14] автори проводили оцінку точності розмірів і якості поверхні нового поліаміду 6 і композиту PA6, який містить 10 % наповнювача, з урахуванням зміни швидкостей і температур під час друку. Встановили, що температура, швидкість і вміст наповнювача суттєво впливають на їх реологічні характеристики. Чистий PA6 виявився оптимальним за умови нижчої температури ($T = 240\text{ }^{\circ}\text{C}$) і вищої швидкості друку (80 мм/с). З іншого боку, PA6 з 10 % наповнювача найкраще відображає якість при температурі 240°C і швидкості 60–80 мм/с.

Lay et al. проводили дослідження для порівняння фізичних і механічних характеристик PLA, ABS і нейлону 6, виготовлених за допомогою FDM та лиття під тиском [15]. Одним із суттєвих висновків цього дослідження було те, що кристалічність зразків PLA та нейлону 6, надрукованих FDM, зросла порівняно зі зразками лиття під тиском. Була виявлено, що міцність на розрив, модуль Юнга, відносно подовження при розриві та ударна міцність для зразка, виготовленого за допомогою FDM, нижчі порівняно зі зразками, виготовленими під тиском, але відсоткова різниця модуля Юнга нейлону 6, надрукованого FDM, становила лише

14%, що було найнижчим показником порівняно з іншими термопластами. Результати цього дослідження показали, що нейлон 6, виготовлений за допомогою FDM, має меншу відсоткову різницю фізичних і механічних властивостей, ніж PLA і ABS, порівняно зі зразками, виготовленими під тиском.

М Ramesh et al. досліджували тривимірний друк нейлонових компонентів [16]. Щільність заповнення мала найвищий коефіцієнт внеску, який впливає на механічні характеристики нейлонового матеріалу під час процесу 3D- друк. Висота шару 0,1 мм вплинула на механічні характеристики, такі як міцність на розтяг, удар і міцність на вигин, але твердість за Шором D була збільшена при 0,3 мм. Було встановлено, що відповідне середнє значення для оптимальних умов становить 43,25 МПа, що знаходиться в межах прогнозованого діапазону. Аналогічно для решти випробувань на вигин, удар і твердість значення, отримані від оптимального параметра, також були в межах прогнозованого діапазону.

Мета роботи

При виборі параметрів процесу FDM необхідно використовувати їх раціональне поєднання, визначення якого залежить від типу та галузі кінцевого використання деталі. Більшість досліджень були направлені на встановлення впливу параметрів на механічні властивості деталей з нейлону, тоді як дослідження шорсткості деталей досить обмежені. Тому, метою дослідження є визначення залежностей параметрів процесу та їх поєднання на шорсткість отриманих деталей з нейлону.

Матеріал і методика досліджень

У дослідженні використовували матеріал - Plexiwire NYLON Filament Ø 1,75 ISO1133-1:2011.

Нейлон можна назвати самим гігроскопічним матеріалом з усіх, що масово застосовуються в 3D- друку. Він швидше і активніше за інші матеріали поглинає вологу з повітря. Тому його потрібно зберігати в герметичних пакетах, обов'язково просувати безпосередньо перед друком, і періодично сушити в процесі зберігання, щоб вологи не накопичилося занадто багато. Просушування робили у електропечі «ЕЛЕКТРО-ТЕРМ» 220В з максимальною температурою 250 °С. На сайті виробника «Plexiwire» [17] було рекомендовано просувати матеріал при температурі 80 °С впродовж трьох годин.

При друці нейлоном потрібно забезпечити надійну фіксацію першого шару, для цього, як допоміжний матеріал, використовували: MonoFilament ELASTAN D100 Ø 1,75. Рекомендується використовувати закриті камери 3D- принтера і виключити обдув, щоб знизити усадку виробу.

У таблиці 1 надані механічні характеристики матеріалу [17].

Таблиця 1 – Властивості Nylon Plexiwire [17]

Властивості	Nylon Plexiwire
Густина, г/см ³	1,20
Температура експлуатації, °С	-30- +120
Модуль пружності при розтягу, МПа	2700
Модуль пружності при згині, МПа	2600
Міцність на розтяг, МПа	78
Відносне подовження при розриві, %	75
Водопоглинання, % 24ч/23 °С, %	3

Зразки дослідження друкували методом FDM на 3D-принтері моделі Profi+. Використовували програмне забезпечення для нарізки CAD-моделі та підготовки G-коду Slic3rPE. Розмір робочої зони 3 D- принтера складав 250 × 250 × 200 мм. Система подачі – боуден; тип екструдера – одинарний; розмір сопла – 0,4 мм; максимальна температура екструдера – 280 °С; максимальна температура столу – 120 °С; максимальна швидкість друку – 100 мм/с. Для проведення досліджень обрано деталь, ескіз якої, показано на рис. 1.

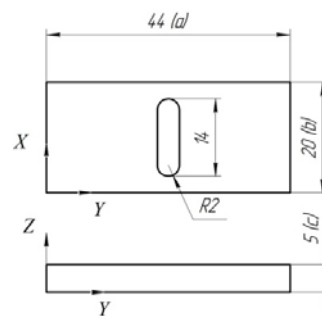


Рисунок 1. Ескіз зразка

На рис. 2 показано схеми заповнення філаментом профілю, які використовувалися в цьому дослідженні. Для визначення шорсткості зразків використовували профілометр 171621. Шорсткість вимірювали в залежності від схеми заповнення зразку, через те що при друці утворювалось наплавлення матеріалу на зразках, було прийнято робити виміри уздовж лінії наплавлення.

Для статистичної обробки результатів використали програмний комплекс STATISTICA.

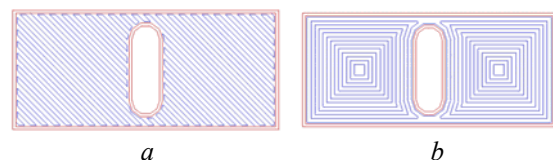


Рисунок 2. Візуалізація прямолінійної (a) та концентричної (b) схеми заповнення

Результати досліджень та обговорення

Метою дослідження є визначення впливу на шорсткість поверхні зразка одночасно великої кількості режимних параметрів, які як передбачається будуть мати вагомий вплив на результат.

Для визначення впливу режимних параметрів процесу FDM на шорсткість одержуваних деталей було розроблено план експерименту. Для кожного параметра процесу використовувалися два рівні варіювання (табл. 2). Для мінімізації загальної кількості експериментів обраний дробний факторний експеримент 2^{10-5} . Як функції відгуку обрана залежна змінна: шорсткість (табл.3).

Після друку зразків відповідно до плану експерименту, виміряна значення функцій відгуку (шорсткість поверхні) по кожному зразку. Їх значення показані в табл. 3.

Таблиця 2 – Вибрані параметри процесу та їх рівні

Параметр процесу FDM	Рівні варіювання	
	-1	+1
1 Висота шару, мм	0,15	0,3
2 Швидкість друку, мм/с	40	80
3 Щільність заповнення, %	25	100
4 Схема заповнення	прямо-лінійна	концентрична
5 Температура платформи, °C	100	120
6 Ширина укладення нитки, мм	0,49	0,52
7 Кількість стінок	2	4
8 Кількість суцільних верхніх та нижніх шарів	2	4
9 Температура екструзії, °C	255	265
10 Екструзійний множник	0,9	1,1

Таблиця 3 – Отримані значення функцій відгуку

№	Ra, мкм	№	Ra, мкм
1	1,56	17	0,36
2	5,01	18	9,54
3	5,24	19	6,68
4	1,03	20	5,42
5	1,40	21	8,68
6	9,69	22	5,34
7	0,66	23	9,07
8	9,65	24	8,87
9	4,95	25	7,76
10	3,93	26	6,77
11	9,54	27	7,11
12	5,20	28	9,15
13	8,32	29	-
14	8,56	30	-
15	8,64	31	-
16	7,26	32	-

Для визначення ступеня статистично обґрунтованого впливу режимних параметрів на формування функції відгуку проведено дисперсійний аналіз (табл. 4). Для зображення ранжування чинників за їх відносним впливом та важливістю виконано аналіз за допомогою діаграми Pareto (рис. 3).

За даними дисперсійного аналізу та діаграми Парето (рис. 3) встановлено, що на шорсткість поверхні статистично значимий вплив має взаємодія таких параметрів «2by7» (швидкість друку та температура платформи), «1by4» (висота шару та щільність заповнення), «1by2» (висота шару та швидкість друку), «1by5» (висота шару та екструзійний множник), «5by9» (екструзійний множник та кількість стінок) та «1by10» (висота шару та кількість суцільних стінок). Також діаграма Парето вказує на те, що для формування шорсткості деталі статистично значущими є ефекти від щільності заповнення, схеми заповнення, екструзійного множника та температури екструзії.

Таблиця 4 – Результати дисперсійного аналізу

Фактори та їх поєднання	Сума квадратів (SS)	Критерій Фішера (F)	Рівень значимості (p-значення)
(3) схема заповнення	36,54	23,96	0,00
(4) щільність заповнення	40,67	26,66	0,00
(5) екструзійний множник	31,42	20,60	0,00
(6) температура екструзії	28,61	18,75	0,00
1 by 2	17,66	11,58	0,00
1 by 4	47,58	31,19	0,00
1 by 5	11,95	7,83	0,01
1 by 10	10,23	6,71	0,01
2 by 7	67,73	44,40	0,00
5 by 9	10,70	7,01	0,01
Помилка	25,93		
Загальна SS	244,95		

Примітка: жирним виділені статистично значимі величини.

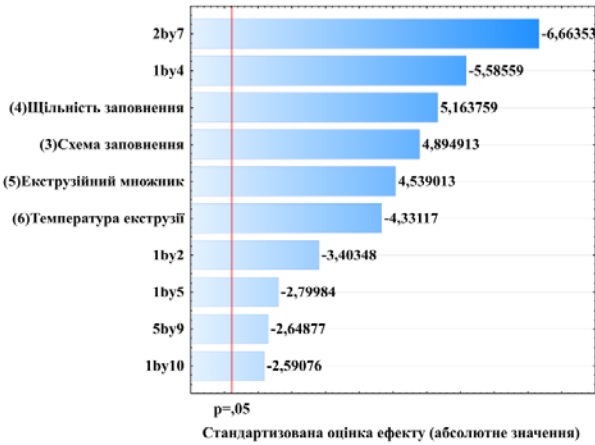


Рисунок 3. Діаграма Парето

Статистична обробка даних виконується на основі заданої математичної моделі, оцінка її якості виконується побудовою графіку передбачуваних та спостережуваних значень для функції відгуку (рис. 4). Оскільки точки на графіку розташовуються поряд з лінією, то можна зробити висновок що використана модель з точки зору статистичної обробки вірно описує вплив досліджуваних факторів на функцію відгуку та її можна використовувати для прогнозування впливу параметрів друку на шорсткість моделі з нейлону, отриманих FDM.

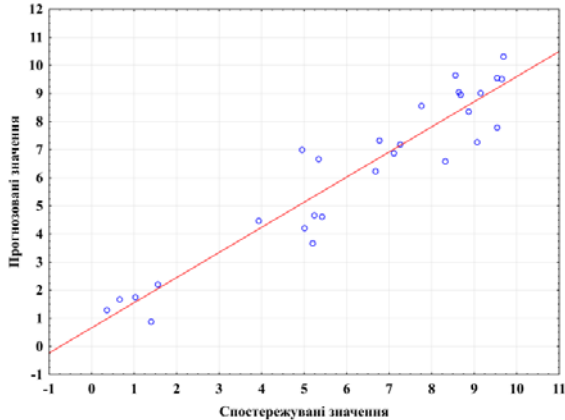


Рисунок 4. Відповідність прогнозованих значень спостережуваним значенням

На основі даних експериментальних досліджень та їх статистичної обробки побудовані графічні залежності, які показують вплив режимних параметрів FDM на формування шорсткості поверхні зразків (рис. 5–14).

На рис. 5, 6 показано вплив схеми заповнення та екструзійного множника на шорсткість поверхні. Збільшення значення екструзійного множника та концентрична схема заповнення призводить до погіршення параметра шорсткості. Оптимальними для даного матеріалу є значення екструзійного множника, яка дорівнює 0,9 та прямолінійної схеми. Ці значення дозволяють отримати найнижчий показник шорсткості поверхні зразків.

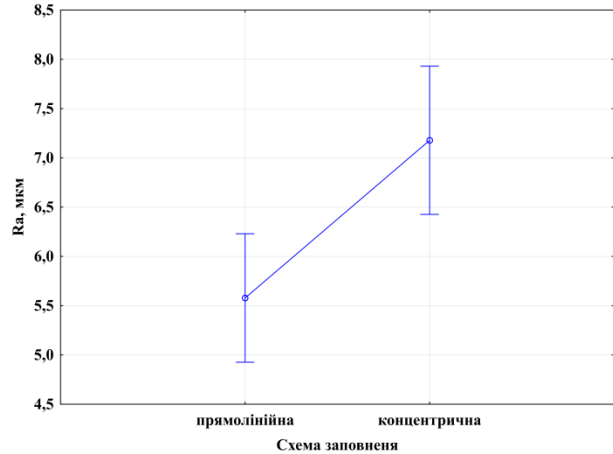


Рисунок 5. Залежність шорсткості поверхні від схеми заповнення

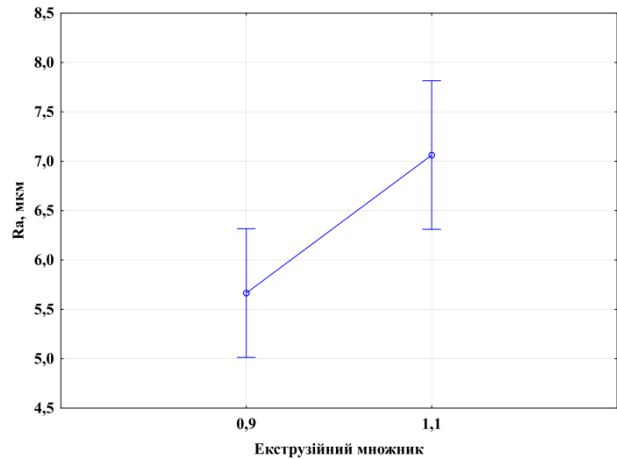


Рисунок 6. Залежність шорсткості поверхні від екструзійного множника

На рис. 7 та 8 показано вплив на формування шорсткості поверхні факторів: температура екструзії та щільність заповнення. Встановлено, що зі збільшенням щільності заповнення значення шорсткості поверхні збільшувалось. Отримано, що для матеріалу – нейлон оптимальною температурою екструзії була 265 °С, що дозволяє отримати нижчу шорсткість поверхні.

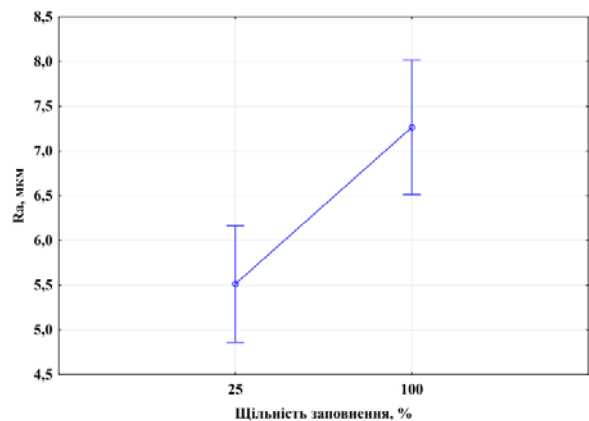


Рисунок 7. Залежність шорсткості поверхні від щільності заповнення

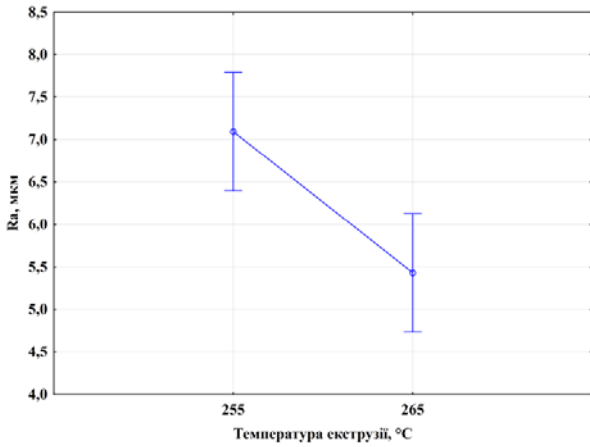


Рисунок 8. Залежність шорсткості поверхні від температури екструзії

Визначено вплив на формування шорсткості поверхні поєднання висоти шару і щільності заповнення (рис. 9) та екструзійного множника і висоти шару (рис. 10).

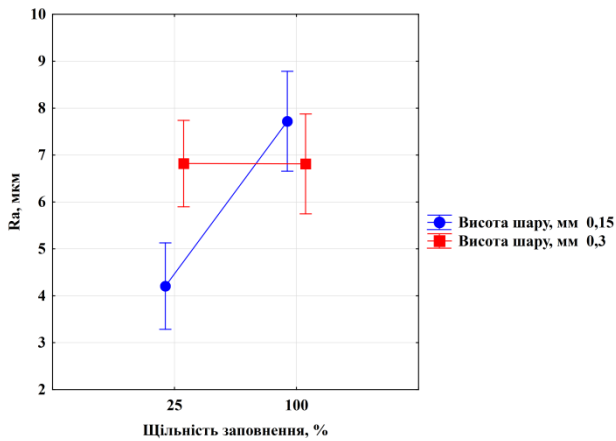


Рисунок 9. Залежність шорсткості поверхні від щільності заповнення та висоти шару

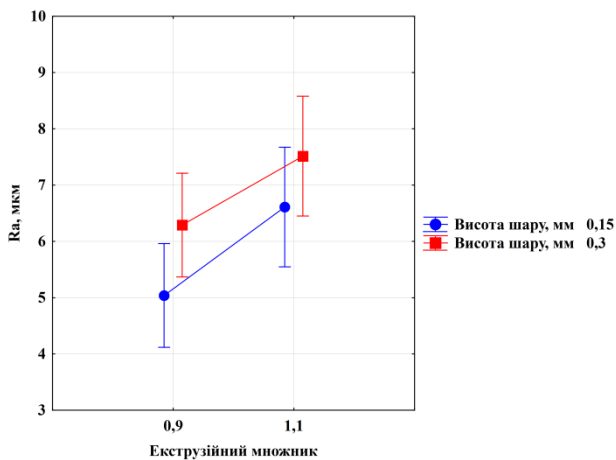


Рисунок 10. Залежність шорсткості поверхні від екструзійного множника та висоти шару

Взаємозв'язок щільності заповнення та висоти шару має не однозначний характер. Так при висоті шару 0,15 мм підвищення щільності заповнення призводить до збільшення шорсткості поверхні, а при висоті шару 0,3 мм зміна значення щільності заповнення не впливає на шорсткість поверхні (рис. 9).

Встановлено, що при висоті шару 0,15 мм збільшення екструзійного множника призводить до погіршення якості поверхні і підвищення шорсткості. Для висоти 0,3 мм ця тенденція зберігається, але значення шорсткості вище (рис. 10).

Досліджено характер впливу на формування шорсткості поверхні поєднання від кількості суцільних верхніх і нижніх шарів, висоти шару, екструзійного множника, кількості стінок, швидкості друку, температури платформи (рис. 11–14).

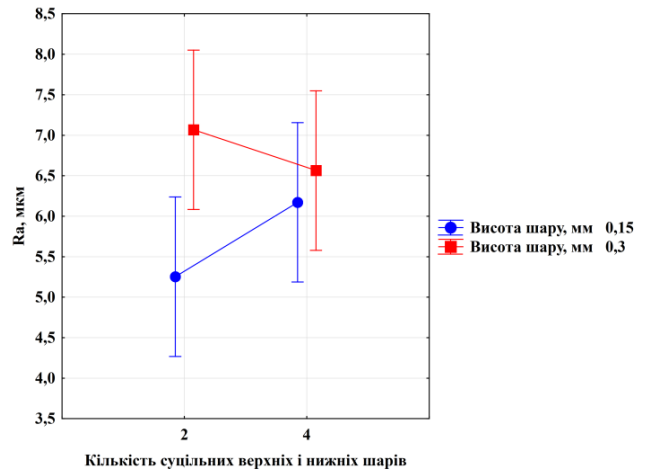


Рисунок 11. Залежність шорсткості поверхні від кількості суцільних верхніх і нижніх шарів та висоти шару

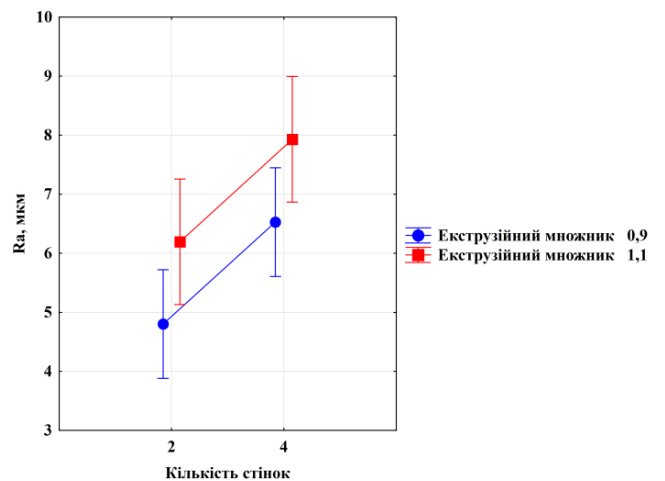


Рисунок 12. Залежність шорсткості поверхні від екструзійного множника та кількості стінок

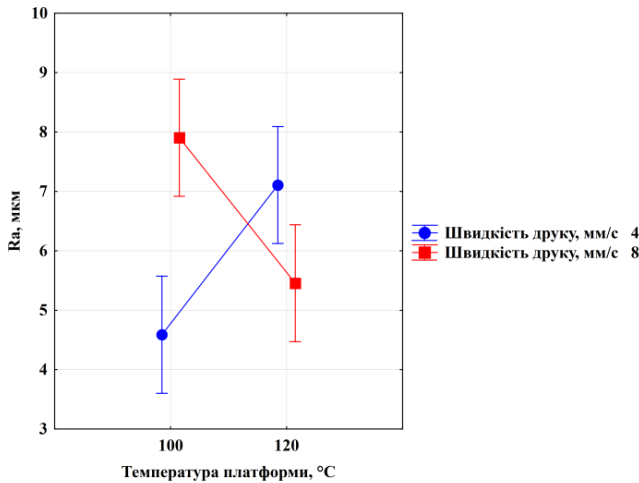


Рисунок 13. Залежність шорсткості поверхні від температури платформи та швидкості друку

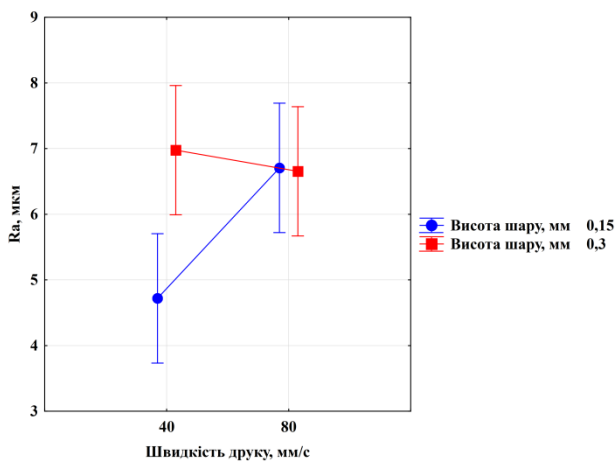


Рисунок 14. Залежність шорсткості поверхні від висоти шару та швидкості друку

При кількості верхніх і нижніх суцільних шарів, яка дорівнює 4 (рис. 11) зміна висоти шару не впливає на значення шорсткості поверхні. Як при висоті шару 0,15, так і при висоті шару 0,3 мм шорсткість поверхні знаходить в одному діапазоні. Використовуючи кількість суцільних верхніх і нижніх шарів, яка дорівнює 2, збільшення висоти шару призводить до збільшення значення шорсткості поверхні. Забезпечити нижчу шорсткість поверхні можна шляхом встановлення кількості стінок, яка дорівнює 2 та значення екструзійного множника – 0,9 (рис. 12).

Велике значення має швидкість друку. При швидкості друку 40 мм/с збільшення температури платформи призводить до великих значень шорсткості, тож оптимальною температурою була 100 °C. Зі збільшенням швидкості ця тенденція змінюється на протилежну (рис. 13). Тож для отримання задовільних результатів шорсткості поверхні при збільшенні швидкості друку, необхідно збільшувати температуру платформи. Це пов'язано з тим, що чим швидше рухається друкувальна головка під час друку, тим більше необхідно акумулювати тепла для того, щоб матеріал міцно зчіплявся з платформою.

При швидкості друку 80 мм/с (рис. 14) зміна висоти шару не впливає на значення шорсткості поверхні. Як при висоті шару 0,15, так і при висоті шару 0,3 мм шорсткість поверхні знаходить в одному діапазоні. Використовуючи швидкість друку 40 мм/с, збільшення висоти шару призводить до збільшення значення шорсткості поверхні. Забезпечити нижчу шорсткість поверхні можна шляхом встановлення швидкості друку – 40 мм/с та висоти шару – 0,15мм. (рис. 14).

Висновки

Виконано оцінку впливу режимів FDM на шорсткість зразків. Оптимальні режими виготовлення визначаються для кожного конкретного випадку, і їх оптимізацію доцільно проводити за допомогою експериментального підходу. Аналіз значень шорсткості поверхні, отриманих на друківаних зразках, дозволив визначити вплив найважливіших та значущих факторів і їх взаємодій на шорсткість. За допомогою дисперсійного аналізу було розглянуто вплив цих факторів, а також їх комбінацій на якість поверхні отриманих зразків.

В результаті встановлено, що на формування шорсткості поверхні деталі значний вплив мають такі фактори: температура екструзії, щільність заповнення, схема заповнення, екструзійний множник та взаємодії: швидкість друку та температура платформи, висота шару та щільності заповнення, висота шару та швидкість друку, висота шару та екструзійний множник, екструзійний множник та кількість стінок та висота шару та кількість суцільних верхніх і нижніх шарів. Визначені оптимальні значення окремих факторів для мінімізації шорсткості: температура екструзії – 265 °C, щільність заповнення – 25 %, схема заповнення – прямолінійна, екструзійний множник – 0,9.

Загалом, дослідження показує складну взаємодію параметрів FDM-процесу та необхідність ретельної їх оптимізації для досягнення потрібної якості деталей.

Список літератури

1. Properties of Oriented Carbon Fiber/Polyamide 12 Composite Parts Fabricated by Fused Deposition Modeling / G. Liao, Z. Li, Y. Cheng et al. // Mater. Des. – 2018. – Vol. 139, P. 283–292. doi:10.1016/j.matdes.2017.11.027
2. Melnikova R. 3D printing of textile-based structures by Fused Deposition Modelling (FDM) with different polymer materials [Electronic resource] / R. Melnikova, A. Ehrmann, K. Finsterbusch // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – Vol. 62, 012018 p. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/62/1/012018>
3. Stansbury J. W. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities [Electronic resource] / Jeffrey W. Stansbury, Mike J. Idacavage // Dental Materials. – 2016. – Vol. 32, No 1. – P. 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.09.018>
4. Statistical and Experimental Analysis of Process Parameters of 3D Nylon Printed Parts by Fused Deposition Modeling: Response Surface Modeling and Optimization [Electronic resource] / Mahmoud Moradi [et al.] // Journal

- of Materials Engineering and Performance. – 2021. – Vol. 30, no. 7. – P. 5441–5454. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05848-4>
5. Wang, X. 3D Printing of Polymer Matrix Composites: A Review and Prospective / X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou and D. Hui // Compos. Part B Eng. – 2017 – Vol. 110, P. 442–458. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>
6. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments [Electronic resource] / Q. Sun [et al.] // Rapid Prototyping Journal. – 2008. – Vol. 14, No. 2. – P. 72–80. <https://doi.org/10.1108/13552540810862028>
7. Berman, B. 3-D Printing: The New Industrial Revolution / B. Berman // Bus Horiz. – 2012 – Vol. 55, P. 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>
8. Zhang X. Fused deposition modeling 3D printing of polyamide-based composites and its applications [Electronic resource] / Xu Zhang, Wei Fan, Tianxi Liu // Composites Communications. – 2020. – Vol. 21, 100413 p. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100413>
9. Preparation of a new filament based on polyamide-6 for three-dimensional printing [Electronic resource] / Yunchao Jia [et al.] // Polymer Engineering & Science. – 2017. – Vol. 57, No. 12, P. 1322–1328. <https://doi.org/10.1002/pen.24515>
10. Shape memory effect of three-dimensional printed products based on polypropylene/nylon 6 alloy [Electronic resource] / Xiaodong Peng [et al.] // Journal of Materials Science. – 2019. – Vol. 54, No. 12. – P. 9235–9246. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03366-2>
11. Singh R. Development of Nylon Based FDM Filament for Rapid Tooling Application [Electronic resource] / R. Singh, S. Singh // Journal of The Institution of Engineers (India): Series C. – 2014. – Vol. 95, No. 2. – P. 103–108. <https://doi.org/10.1007/s40032-014-0108-2>
12. Bonding quality and fracture analysis of polyamide 12 parts fabricated by fused deposition modeling [Electronic resource] / Hao Li [et al.] // Rapid Prototyping Journal. – 2017. – Vol. 23, No. 6, P. 973–982. <https://doi.org/10.1108/rpj-03-2016-0033>
13. Vishwas M. Experimental Investigation using Taguchi Method to Optimize Process Parameters of Fused Deposition Modeling for ABS and Nylon Materials [Electronic resource] / M. Vishwas, C. K. Basavaraj, M. Vinyas // Materials Today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5, No. 2. – P. 7106–7114. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.375>
14. Mechanical and physical properties of highly ZrO₂ /β-TCP filled polyamide 12 prepared via fused deposition modelling (FDM) 3D printer for potential craniofacial reconstruction application / Abdul Manaf Abdullah [et al.] // Materials Letters. – 2017. – Vol. 189, P. 307–309. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.11.052>
15. Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding [Electronic resource] / Makara Lay [et al.] // Composites Part B: Engineering. – 2019. – Vol. 176, 107341 p. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107341>
16. Ramesh M. Mechanical investigation and optimization of parameter selection for Nylon material processed by FDM [Electronic resource] / M. Ramesh, K. Panneerselvam // Materials Today: Proceedings. – 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.697>
17. Властивості Nylon Plexiwire [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://shop.plexiwire.com.ua/nylon-filament/nylon-natural-400/>.

Одержано 24.06.2024

QUALITY ASSURANCE OF PARTS MADE OF NYLON OBTAINED BY FUSED DEPOSITION MODELING

- Tumarchenko L. Postgraduate student, Department of Mechanical Engineering, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: hurina97@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7973-7475
- Vyshnepolskyi Y. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: evishnepolskiy@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8048-7976

Purpose. A comprehensive study of the Fused Deposition Modeling (FDM) process parameters influence on the surface roughness of parts.

Research methods. The samples for research were produced by the FDM method on a Profi+midi 3D printer. Slic3rPE software were used for CAD model slicing and G-code preparation. The samples were printed using Nylon filament from the Plexiwire company. Drying of the material before printing was carried out in the ELEKTROTERM electric furnace. The 171621 profilometer was used to determine the roughness of the samples. The STATISTICA software package was used for statistical processing of the results.

Results. The influence of different combinations of FDM process parameters on the surface roughness of parts was examined. Surface roughness was found to be most influenced by the following interactions: printing speed and bed temperature, layer height and infill density, layer height and printing speed, layer height and extrusion multiplier,

extrusion multiplier and number of shells and layer height and number of solid top and bottom layers. In addition, the following factors separately affect the roughness: infill density, infill pattern, extrusion multiplier and extrusion temperature.

Scientific novelty. A rational combination of FDM process parameters has been determined at which the minimum surface roughness is achieved. Thus, it was determined that the roughness has a lower value at a rectilinear infill pattern, and at a infill density of 25 %, an extrusion multiplier of 0.9, an extruder temperature of 265 °C, a printing speed of 40 mm/s, a layer height of 0.15 mm, a number of solid layers of 2 and a platform temperature of 100 °C, the roughness value decreases. If the bed temperature and printing speed are increased, the roughness value will increase, as will the layer height and infill density. Increasing the extrusion multiplier or decreasing the extruder temperature have a negative impact on the surface roughness. All other parameters had almost no effect on surface roughness.

Practical value. The results of the study make it possible to predict and improve the quality of nylon parts produced by FDM due to establishing optimal process conditions.

Key words: Fused Deposition Modeling, surface roughness, process parameters, nylon, dispersion analysis, surface quality.

References

1. Liao, G., Li, Z., Cheng, Y., Xu, D., Zhu, D., Jiang, S., Guo, J., Chen, X., Xu, G., & Zhu, Y. (2018). Properties of oriented carbon fiber/polyamide 12 composite parts fabricated by fused deposition modeling. *Materials & Design*, 139, 283–292. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.027>
2. Melnikova, R., Ehrmann, A., & Finsterbusch, K. (2014). 3D printing of textile-based structures by Fused Deposition Modelling (Fdm) with different polymer materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 62, 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/62/1/012018>
3. Stansbury, J. W., & Idacavage, M. J. (2016). 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dental Materials*, 32(1), 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.09.018>
4. Moradi, M., Aminzadeh, A., Rahmatabadi, D., & Rasouli, S. A. (2021). Statistical and experimental analysis of process parameters of 3d nylon printed parts by fused deposition modeling: Response surface modeling and optimization. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(7), 5441–5454. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05848-4>
5. Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 110, 442–458. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>
6. Sun, Q., Rizvi, G. M., Bellehumeur, C. T., & Gu, P. (2008). Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyping Journal*, 14(2), 72–80. <https://doi.org/10.1108/13552540810862028>
7. Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>
8. Zhang, X., Fan, W., & Liu, T. (2020). Fused deposition modeling 3D printing of polyamide-based composites and its applications. *Composites Communications*, 21, 100413. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100413>
9. Jia, Y., He, H., Peng, X., Meng, S., Chen, J., & Geng, Y. (2017). Preparation of a new filament based on polyamide-6 for three-dimensional printing. *Polymer Engineering & Science*, 57(12), 1322–1328. <https://doi.org/10.1002/pen.24515>
10. Peng, X., He, H., Jia, Y., Liu, H., Geng, Y., Huang, B., & Luo, C. (2019). Shape memory effect of three-dimensional printed products based on polypropylene/nylon 6 alloy. *Journal of Materials Science*, 54(12), 9235–9246. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03366-2>
11. Singh, R., & Singh, S. (2014). Development of nylon based fdm filament for rapid tooling application. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 95(2), 103–108. <https://doi.org/10.1007/s40032-014-0108-2>
12. Li, H., Zhang, S., Yi, Z., Li, J., Sun, A., Guo, J., & Xu, G. (2017). Bonding quality and fracture analysis of polyamide 12 parts fabricated by fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 23(6), 973–982. <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2016-0033>
13. Vishwas, M., Basavaraj, C. K., & Vinyas, M. (2018). Experimental investigation using taguchi method to optimize process parameters of fused deposition modeling for abs and nylon materials. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 7106–7114. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.375>
14. Abdullah, A. M., Tuan Rahim, T. N. A., Mohamad, D., Akil, H. M., & Rajion, Z. A. (2017). Mechanical and physical properties of highly ZrO₂ /β-TCP filled polyamide 12 prepared via fused deposition modelling (Fdm) 3D printer for potential craniofacial reconstruction application. *Materials Letters*, 189, 307–309. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.11.052>
15. Lay, M., Thajudin, N. L. N., Hamid, Z. A. A., Rusli, A., Abdullah, M. K., & Shuib, R. K. (2019). Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107341. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107341>
16. Ramesh, M., & Panneerselvam, K. (2021). Mechanical investigation and optimization of parameter selection for Nylon material processed by FDM. *Materials Today: Proceedings*, 46, 9303–9307. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.697>
17. Properties Nylon Plexiwire. Available at: <https://shop.plexiwire.com.ua/nylon-filament/nylon-natural-400>