

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 кафедри технології машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: evishnepolskiy@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8048-7976

ВПЛИВ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДОМ НАПЛАВЛЕННЯ НА ЧАС ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ БПЛА

Мета роботи. Дослідити закономірності впливу режимних параметрів Моделювання Методом Наплавлення - Fused Deposition Modeling (FDM) на час виготовлення 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 з використанням філаменту ABS+ від компанії MonoFilament. Для статистичної обробки результатів використали програмний комплекс STATISTICA.

Отримані результати. Досліджено вплив різного поєднання режимних параметрів друку FDM (швидкість друку, висота шару, траєкторія заповнення, відсоток заповнення) на час виготовлення виробів. Встановлено основні фактори, що впливають на час виготовлення: швидкість друку, висота шару, щільність заповнення та взаємодія цих факторів.

Наукова новизна. Аналіз залежності часу друку від висоти шару та щільності заповнення показав, що при виборі товщини шару 0,15 мм та 25 % заповнення та товщини шару 0,3 мм та 100 % заповненні час друку виявився майже однаковим. Встановлено, що для висоти шару 0,15мм при швидкості друку 40 мм/с значно збільшується час друку порівняно зі швидкістю друку 80 мм/с, тоді як при виборі висоти шару 0,3 мм – час друку менше і зменшення швидкості друку призводить до невеликого збільшення часу друку порівняно з висотою шару 0,15 мм. Встановлено, що збільшення швидкості друку призводить до зменшення часу друку, а збільшення щільності заповнення – до збільшення часу друку. Так час друку при швидкості друку 40 мм/с та щільності 25 % незначно відрізняється при швидкості 80 мм/с та щільності 100 %.

Практична цінність. Отримано регресійне рівняння, що дозволяє прогнозувати вплив режимних параметрів друку FDM на час виготовлення деталей.

Ключові слова: Моделювання Методом Наплавлення, час виготовлення, режимні параметри, щільність заповнення, дисперсійний аналіз, регресійний аналіз.

Вступ

Вагомою особливістю конкурентного промислового виробництва є скорочення терміну виробництва виробів одночасно із забезпеченням високої якості деталей. Цього можна досягти за допомогою адитивних технологій виробництва деталей. Адитивне виробництво (Additive Manufacturing (AM)) – це напрям, який найбільш динамічно розвивається сьогодні. Існує безліч технологій, які можна назвати адитивними, оскільки об'єднує їх одне: побудова моделі відбувається шляхом додавання матеріалу (від англ. Add - «додавати») на відміну від традиційних технологій, де створення деталі відбувається шляхом видалення «зайвого» матеріалу [1–2].

Перспективність застосування адитивного виробництва виросла у декілька разів останнім часом. Галузями де зазначені технології є вирішальними стали військова та аерокосмічна промисловість, машинобудування та медицина. Сучасні обставини вимагають отримання для військових максимальної кількості безпілотних літальних апаратів при їх мінімальній вартості, а для лікарів та пацієнтів зниження вартості імплантів та протезів можуть бути вирішальними факторами для збереження пацієнту нормальних умов життя при отриманні важких травм.

AM забезпечують скорочення тривалості технологічної підготовки та витрат під час виробництва нових виробів. Компанії Boeing, Douglas Aircraft Company, Lockheed Martin, Airbus S.A.S. (EADS) та

Northrop Grumman, Bell Helicopter, NASA, GE Aviation почали впроваджувати AM з 1990-х років. В даний час AM активно застосовуються для виготовлення деталей військових (F/A-18 Hornet) та пасажирських літаків (Boeing 737 Scalemodel, Boeing 787 Dreamliner, Airbus A350), гелікоптерів (MV-22 Osprey, Bell Model 412), а також багатьох безпілотних літальних апаратів (Aurora Flight Sciences, SULSA, Лелека-100, SKIF, Фурія, Spectator): повітроводів, друкованих плат, антен, сенсорів, кабель-каналів, обтічників ІЧ-камер, конструкцій крісел та внутрішньої обробки пасажирських салонів, паливних баків, деталей турбогвинтових двигунів.

Одним із найпоширеніших процесів, завдяки своїй універсальності та низькій вартості, є Fused Deposition Modelling (FDM). Цей метод, як правило, використовує термопластичні полімери. І якщо на початку FDM застосовувався для стендових прототипів і моделей, то в даний час він все частіше використовується для виготовлення функціональних виробів. Ця технологія виробництва дозволяє виготовляти деталі широкого спектру, оскільки вона має велику гнучкість.

В даний час процес FDM є актуальним для виготовлення конструктивних елементів сучасних безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Конкурентна боротьба між їх виробниками призводить до постійного підвищення вимог, які до них пред'являються.

Незважаючи на те, що це один із найбільш використовуваних процесів AM, його застосування у виробництві функціональних виробів досить обмежено. Це пов'язано з великою кількістю параметрів, що керують процесом, які не достатньо досліджені та відсутністю їх стандартизації. Ці параметри процесу впливають на час виготовлення, використання матеріалу, міцність і шорсткість поверхні деталей [3–4].

Крім того, покращення одних параметрів може призводити до погіршення інших, наприклад, зменшення часу виготовлення виробу супроводжується зниженням міцності деталей [5].

Аналіз досліджень та публікацій

Щоб конкурувати з традиційними виробничими процесами, скорочення часу виробництва є однією з головних задач для процесів адитивного виробництва, які використовуються в промислових умовах. Тому, поряд із такими характеристиками деталей, як шорсткість поверхні, точність розмірів і механічні властивості, скорочення часу виготовлення є важливою вимогою для виробництва функціональних деталей. Як і інші характеристики деталей FDM, час виготовлення також залежить від параметрів процесу, і його можна мінімізувати шляхом вибору їх раціональної комбінації.

Nancharaiyah [6] проводив дослідження впливу трьох параметрів процесу (товщини шару, повітряного зазору між нитками та орієнтації наплавленої нитки) на час виготовлення. Результати показали, що велика товщина шару та позитивний повітряний зазор

зменшили час виготовлення; товщина шару була найважливішим параметром процесу, а орієнтація наплавленої нитки була незначною для часу виготовлення. Кумар та ін. [7] досліджували вплив товщини шару, орієнтації наплавленої нитки, ширини наплавленої нитки, орієнтації побудови та ширини оболонки на час виготовлення. Їх висновок був схожий на висновок, зроблений в [6]; орієнтація наплавленої нитки була несуттєвою для часу виготовлення. Вплив товщини шару, ширини наплавленої нитки, орієнтації наплавленої нитки, кількості оболонок, повітряного зазору, відхилення та кут STL на час виготовлення вивчали Ali та ін. [8]. У цій статті було вперше проаналізовано вплив відхилення та кут STL. Відхилення та кут STL варіювалися при створенні моделі STL з моделі CAD зразка. Відхилення STL дозволяє задати відхилення по нормалі трикутної грані поверхні від вихідної поверхні. Кут STL дозволяє задати кут між нормальними суміжних трикутних граней поверхні. Потім усі згенеровані STL-моделі були імпортовані до програмного забезпечення, де варіювалися інші параметри процесу. Результати показали, що відхилення та кут STL були незначні для часу виготовлення.

Rathee та ін. [9] досліджували вплив товщини шару, ширини оболонки, повітряного зазору, ширини наплавленої нитки, орієнтації наплавленої нитки та орієнтації побудови на час виготовлення. Результати дослідження показали, що товщина шару була найважливішим параметром, а іншими важливими параметрами була орієнтація наплавленої нитки і повітряний зазор.

Wu [10] вивчав вплив товщини шару на деякі характеристики деталей, і однією з них був час виготовлення. Результати були такими ж, як і в інших дослідженнях, згідно з якими час виготовлення зменшувався зі збільшенням товщини шару.

Виходячи з результатів розглянутих робіт щодо часу виготовлення, було встановлено, що він є мінімальним при більшій товщині шару та нульовій орієнтації побудови [11].

Аналіз літератури дозволяє зробити висновок, що вплив багатьох режимних параметрів технології FDM, таких як щільність заповнення, швидкість друку, схема заповнення на час виготовлення досі досліджено недостатньо. У зв'язку з цим дослідження впливу цих режимних параметрів та їх комбінацій на час виготовлення виробів є актуальним завданням при виробництві функціональних деталей.

Об'єктом цього дослідження був процес fused deposition modeling з різними режимами. Предметом дослідження були закономірності впливу режимних параметрів FDM на час виготовлення деталей..

Мета роботи

При виборі параметрів процесу FDM необхідно використовувати їх раціональне поєднання, визначення якого залежить від типу та галузі кінцевого використання деталі. Основна мета цього дослідження зосереджена на визначенні зв'язку між вибраними параметрами процесу FDM і показником продуктив-

ності, таким як час виготовлення деталі.

Матеріал і методика досліджень

Зразки для дослідження (рис. 1) друкували методом FDM на 3д-принтері моделі Profi+. Використовували програмне забезпечення для нарізки CAD-моделі та підготовки G-коду – Slic3rPE. Розмір робочої зони 3д-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. Осі, зображені на рис. 1 відповідають розташуванню зразка під час друку на столі 3Д-принтера.

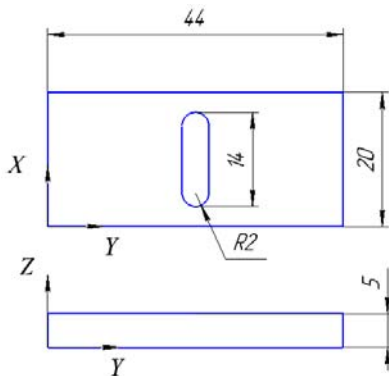


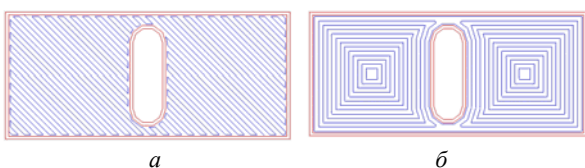
Рисунок 1. Ескіз зразка

Зразки друкували з використанням філаменту ABS+ від компанії MonoFilament. Властивості матеріалу наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Властивості ABS+ [12]

Властивості	ABS+ Monofilament
Температура екструзії, °С	215–230
Температура платформи, °С	80–95
Щільність, г/см ³	1,05
Температура експлуатації, °С	-20...+80
Міцність на розтяг, МПа	40
Відносне подовження при розриві, %	35
Ударна в'язкість непрокидна по Шарпі (23 °С), кДж/м ²	208

На рис. 2 показано схеми заповнення філаментом профілю, які використовувалися в цьому дослідженні. Щільність заповнення у відсотках, висоту шару, швидкість друку та схему геометрії заповнення зразка встановлювали в програмному забезпеченні Slic3rPE.



а

б

Рисунок 2. Візуалізація прямолинійної (а) та концентричної (б) схеми заповнення

Результати досліджень та обговорення

Для визначення впливу режимних параметрів процесу FDM на час виготовлення деталей було розроблено план експерименту. Для кожного параметра процесу використовувалося два рівні варіювання (табл. 2). Як функція відгуку вибрано залежну змінну: час друку (*t*).

Таблиця 2 – Вибрані параметри процесу та їх рівні

Параметр процесу FDM	Рівень варіювання	
	-1	+1
1 Висота шару (<i>h</i>), мм	0,15	0,3
2 Швидкість друку (<i>v</i>), мм/с	40	80
3 Щільність заповнення (<i>dens</i>), %	25	100
4 Схема заповнення (<i>tr</i>)	прямолинійна	концентрична

Результати аналізу впливу режимів FDM на час виготовлення деталі наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Дворівневий факторний план експерименту типу 2⁴⁻⁰ і час виготовлення

№	Рівні				Значення функції відклику <i>t</i> , хв
	<i>h</i>	<i>v</i>	<i>dens</i>	<i>tr</i>	
1	-1	-1	-1	-1	20
2	+1	-1	-1	-1	13
3	-1	+1	-1	-1	13
4	+1	+1	-1	-1	8
5	-1	-1	+1	-1	31
6	+1	-1	+1	-1	18
7	-1	+1	+1	-1	19
8	+1	+1	+1	-1	11
9	-1	-1	-1	+1	20
10	+1	-1	-1	+1	13
11	-1	+1	-1	+1	13
12	+1	+1	-1	+1	8
13	-1	-1	+1	+1	32
14	+1	-1	+1	+1	18
15	-1	+1	+1	+1	20
16	+1	+1	+1	+1	12

Для оцінки впливу досліджуваних факторів на функції відповіді застосовували дисперсійний аналіз. Встановлено, що на час виготовлення деталі найбільше впливають: висота шару, швидкість друку, щільність заповнення та парна взаємодія цих факторів (табл. 4).

Аналіз діаграми Парето (рис. 3) вказує на те, що для формування часу друку статистично значущими є ефекти від висоти шару, щільності заповнення, швидкості друку та парної взаємодії між ними. Від’ємне значення факторів висоти шару, швидкості друку та парної взаємодії між висотою і щільністю заповнення говорить про те, що при їх збільшенні час виготовлення деталі буде зменшуватися.

Таблиця 4 – Результати дисперсійного аналізу

Фактори та їх поєднання	Сума квадратів (SS)	Критерій Фішера (F)	Рівень значимості (p-значення)
(1) висота шару	280,56	561,12	0,00
(2) швидкість друку	232,56	465,12	0,00
(3) щільність заповнення	175,56	351,12	0,00
(4) схема заповнення	0,56	1,12	0,32
1 by 2	14,06	28,12	0,0
1 by 3	22,56	45,12	0,00
2 by 3	10,56	21,12	0,00
Помилка	4,00		
Загальна SS	740,44		

Примітка: жирним виділені статистично значимі величини.

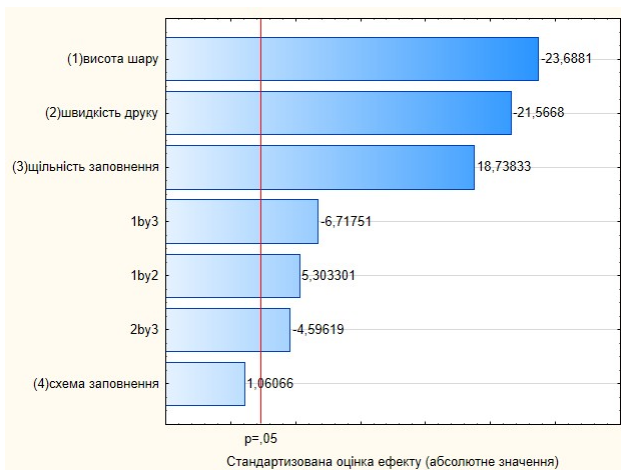


Рисунок 3. Діаграма Парето

Необхідно відзначити, що діаграма розсіювання за усередненими значеннями показників не містить різних відхилень експериментальних точок від загальної прямої (рис. 4). Оскільки кожна з точок даних знаходиться досить близько до прогнозованої лінії регресії, це говорить про те, що отримана лінійна модель задовільно описує вплив факторів на функцію відгуку.

Аналіз залежності часу друку від висоти шару та щільності заповнення (рис. 5) показав, що підвищення

щільності друку та зменшення висоти шару значно збільшує час друку. Час друку збільшується через зменшення висоти шару, оскільки друкований об’єкт потребуватиме більшої кількості шарів.

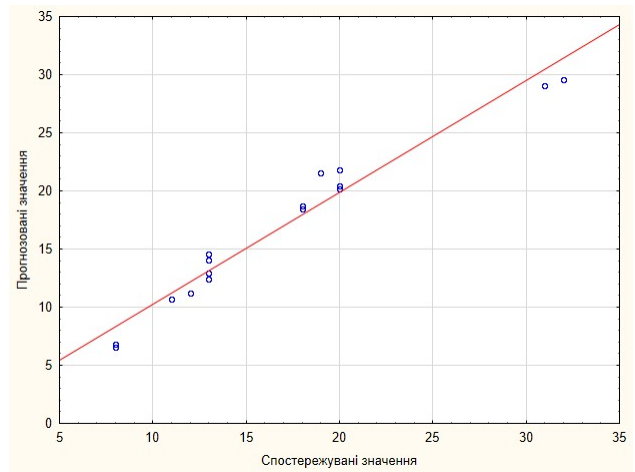


Рисунок 4. Відповідність прогнозованих значень спостережуваним значенням

Час друку виявився майже однаковим при виборі товщини шару 0,15 мм та 25 % заповнення та товщини шару 0,3 мм та 100 % заповненні. Для меншої висоти шару підвищення щільності заповнення значно збільшує час друку, тоді як при виборі більшої висоти шару і підвищенні щільності заповнення спостерігається невелике збільшення часу друку.

Час друку збільшується через зменшення висоти шару, оскільки друкований об’єкт потребуватиме більшої кількості шарів.

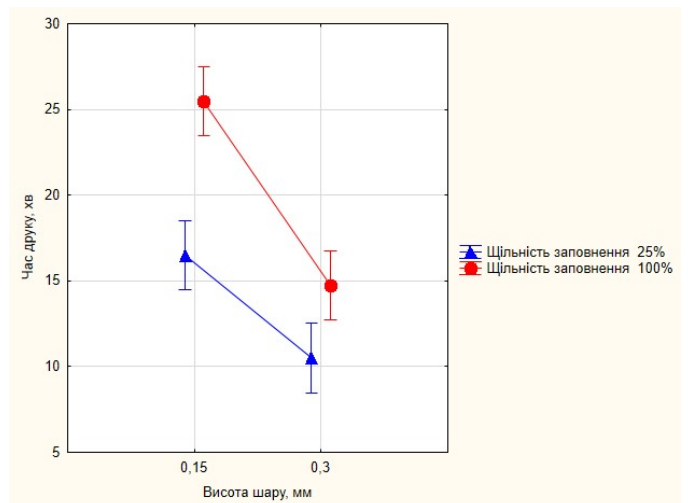


Рисунок 5. Залежність часу друку від висоти шару та щільності заповнення

Досліджено ефект впливу висоти шару та швидкості друку на час друку (рис. 6). Встановлено, що для висоти шару 0,15 мм при швидкості друку 40 мм/с значно збільшується час друку порівняно зі швидкістю друку 80 мм/с, тоді як при виборі висоти шару 0,3 мм час друку менше і зменшення швидкості друку

приводить до невеликого збільшення часу друку порівняно з висотою шару 0,15 мм.

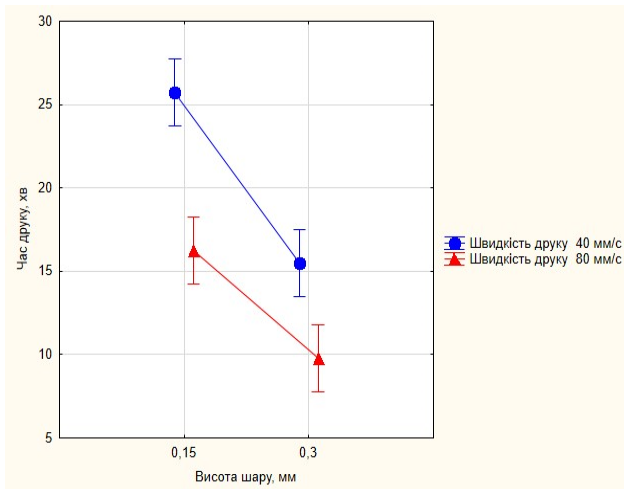


Рисунок 6. Ефект впливу висоти шару та швидкості друку на час друку

Залежність часу друку від швидкості друку та щільності заповнення показано на рис.7. Встановлено, що збільшення швидкості друку призводить до зменшення часу друку, а збільшення щільності заповнення – збільшення часу друку. Однак значення часу друку знаходяться в одному діапазоні при поєднанні цих факторів. Так, час друку при швидкості друку 40 мм/с та щільності 25 % незначно відрізняється від такого при швидкості 80 мм/с та щільності 100%. Виходячи з цього можна зробити висновок, що зважаючи на призначення деталі та вимог при її виробництві, можна вибрати оптимальну комбінацію режимних параметрів процесу і при цьому не втратити в часі.

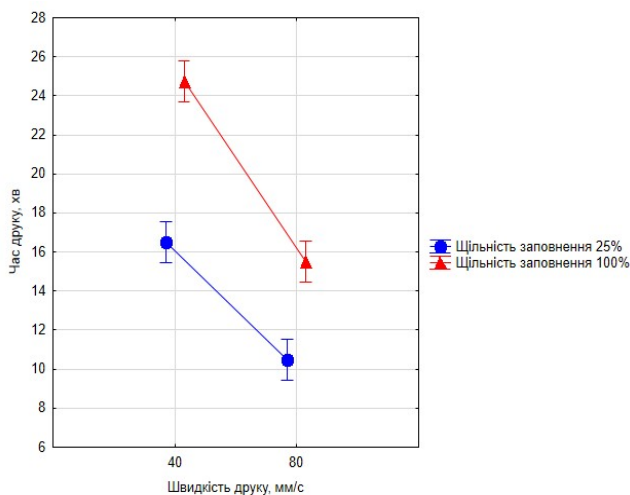


Рисунок 7. Залежність часу друку від швидкості друку та щільності заповнення

На підставі статистичної обробки отримано рівняння, яке дозволяє прогнозувати час друку FDM при різному поєднанні режимних параметрів процесу друку:

$$t = 33,73 - 66,94 \cdot h - 0,26 \cdot v + 0,25 \cdot dens + 0,62 \cdot h \cdot v -$$

$$-0,42 \cdot h \cdot dens - 0,001 \cdot v \cdot dens, \quad (1)$$

де t – час виготовлення, хв;
 h – висота шару, мм;
 $dens$ – щільність заповнення, %;
 v – швидкість друку, мм/с.

Висновки

Здійснено оцінку впливу режимних параметрів друку FDM (висота шару, швидкість друку, траєкторія заповнення, щільність заповнення) на час виготовлення деталі. Встановлено, що на час виготовлення найбільший вплив мають такі фактори: висота шару, швидкість друку, щільність заповнення та взаємодія цих факторів.

Аналіз залежності часу друку від висоти шару та щільності заповнення показав, що при виборі товщини шару 0,15 мм та 25 % заповнення та товщини шару 0,3 мм та 100 % заповненні час друку виявився майже однаковим. Можна зробити висновок, що для меншої висоти шару підвищення щільності заповнення значно збільшує час друку, тоді як при виборі більшої висоти шару і підвищенні щільності заповнення призводить до невеликого збільшення часу друку.

Встановлено, що для висоти шару 0,15 мм при швидкості друку 40 мм/с значно збільшується час друку порівняно зі швидкістю друку 80 мм/с, тоді як при виборі висоти шару 0,3 мм - час друку менше і зменшення швидкості друку призводить до невеликого збільшення часу друку порівняно з висотою шару 0,15 мм.

Встановлено, що збільшення швидкості друку призводить до зменшення часу друку, а збільшення щільності заповнення – до збільшення часу друку. Так, час друку при швидкості друку 40 мм/с та щільності 25 % незначно відрізняється від такого при швидкості 80 мм/с та щільності 100 %.

Отримано рівняння лінійної регресії, що дозволяє прогнозувати вплив режимних параметрів процесу друку FDM на час виготовлення деталей.

Виходячи з результатів дослідження можна зробити висновок, що зважаючи на призначення деталі та вимоги при її виробництві, можна вибрати оптимальну комбінацію режимних параметрів процесу і при цьому не втратити в часі, але треба враховувати те, що підвищення значення таких режимних параметрів, як швидкість друку та висота шару значно знижує якість отриманої поверхні.

Список літератури

1. ASTM (2012). Standard terminology for additive manufacturing technologies. Standard F2792-12a, ASTM International. West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/F2792-10>
2. Ivanova O. Additive manufacturing (AM) and nanotechnology: promises and challenges / O. Ivanova, C. Williams, T. Campbell // Rapid Prototyp J. – 2013. – Vol. 19, Issue 5 – P. 3–8. doi:10.1108/RPJ-12-2011-0127

3. Srivastava M. Multi-response optimization of fused deposition modelling process parameters of ABS using response surface Methodology (RSM)-Based desirability analysis / M. Srivastava, S. Maheshwari, TK. Kundra // Mater Today Proc. – 2015. – Vol. 2, Issue 4. доробки – 3471 р. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.043>
4. Mohamed O. A. Optimization of fused deposition modeling process parameters: A review of current research and future prospects / O. A. Mohamed, S. H. Masood, J. L. Bhowmik // Adv. Manuf. – 2015. – Vol. 3 – P. 42–53. doi: 10.1007/s40436-014-0097-7
5. Chacón J. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection / J. Chacón, M. Caminero, E. García-Plaza, P. Núñez // Mater. Des. – 2017. – Vol. 124. – P. 143–157. doi:10.1016/j.matdes.2017.03.065
6. Nancharaiah T. Optimization of process parameters in FDM process using design of experiments / T. Nancharaiah // Int. J. Emerg. Technol. – 2011. – Vol. 2 – P. 100–102.
7. Kumar G.P. Optimization of support material and build time in fused deposition modeling (FDM) / G.P. Kumar, S.P. Regalla // Appl. Mech. Mater. – 2012. – Vol. 110–116 – P. 2245–2251. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.2245
8. Ali, F. Influence of some process parameters on build time, material consumption, and surface roughness of FDM processed parts: Inferences based on the Taguchi design of experiments / F. Ali, B.V. Chowdary, J. Maharaj // Proceedings of the 2014 IAJC/ISAM Joint International Conference, ISBN: 978-1-60643-379-9.
9. Rathee S. Effect of varying spatial orientations on build time requirements for FDM process: A case study / S. Rathee, M. Srivastava, S. Maheshwari, A.N. Siddiquee // Def. Technol. – 2017. – Vol. 13. – P. 92–100. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2016.11.006>
10. Wu J. Study on optimization of 3D printing parameter. / J. Wu // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. – 2018. – 392, 062050. doi: 10.1088/1757-899X/392/6/062050
11. Dey A. A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics / A. Dey, N. Yodo // J. Manuf. Mater. Process. – 2019. – Vol. 3. – P. 64. <https://doi.org/10.3390/jmmp3030064>
12. Властивості ABS+ MonoFilament [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://monofilament.com.ua/ua/products/standartnye-materialy/abs-plus/abs-plus-bezhevyj>.

Одержано 21.11.2023

Після доробки 06.12.2023

INFLUENCE OF FUSED DEPOSITION MODELING REGIME PARAMETERS ON MANUFACTURING TIME OF UAV PARTS

- Tumarchenko L. Postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering Technology, 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 Technology, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: evishnepolskiy@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8048-7976

Purpose. Investigate the regularities of FDM process parameters influence on the manufacturing time 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 ABS+ filament. The STATISTICA software package was used for statistical processing of the results.

Results. The influence of different combinations of FDM process parameters (printing speed, layer height, infill geometry, infill density) on the manufacturing time of products was examined. The main factors affecting the manufacturing time were established: printing speed, layer height, infill density and the interaction of these factors

Scientific novelty. Analysis of the manufacturing time dependence on the layer height and the infill density showed that when selecting a layer height of 0.15 mm and 25 % infill and a layer height of 0.3 mm and 100% infill, the manufacturing time turned out to be nearly identical. It can be concluded that for a lower layer height, increasing the infill density significantly increased the manufacturing time, while setting a higher layer and increasing the infill density led to a small increase in the manufacturing time. It was found that for a layer height of 0.15 mm at a printing speed of 40 mm/s, the manufacturing time significantly increased compared to a printing speed of 80 mm/s, while when selecting a layer height of 0.3 mm, the manufacturing time is less and a decrease in the printing speed led to a small increase of manufacturing time compared to a layer height of 0.15 mm. It was established that an increase in printing speed led to a decrease in manufacturing time and an increase in infill density led to an increase in manufacturing time. Thus, the manufacturing time at a printing speed of 40 mm/s and infill density of 25 % differed slightly from a printing speed of 80 mm/s and infill density of 100 %.

Practical value. A regression equation was obtained which allowed predicting the influence of the FDM process parameters on the manufacturing time of parts.

Key words: Fused Deposition Modeling, manufacturing time, process parameters, variance analysis, regression analysis.

References

1. ASTM (2012). Standard terminology for additive manufacturing technologies. Standard F2792-12a, ASTM International. West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/F2792-10>
2. Ivanova, O., Williams, C., Campbell, T. (2013). Additive manufacturing (AM) and nanotechnology: promises and challenges. *Rapid Prototyp J*, 19(5), 3–8. doi:10.1108/RPJ-12-2011-0127
3. Srivastava, M., Maheshwari, S., Kundra, TK. (2015). Multi-response optimization of fused deposition modelling process parameters of ABS using response surface Methodology (RSM)-Based desirability analysis. *Mater Today Proc*, 2(4-5), 3471. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.043>
4. Mohamed, O.A.; Masood, S.H.; Bhowmik, J.L. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: A review of current research and future prospects. *Adv. Manuf.*, 3, 42–53. doi: 10.1007/s40436-014-0097-7
5. Chacón, J., Caminero, M., García-Plaza, E., Núñez, P. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Mater. Des.*, 124, 143–157. doi:10.1016/j.matdes.2017.03.065
6. Nancharaiah, T. (2011). Optimization of process parameters in FDM process using design of experiments. *Int. J. Emerg. Technol.*, 2, 100–102.
7. Kumar, G.P., Regalla, S.P. (2012). Optimization of support material and build time in fused deposition modeling (FDM). *Appl. Mech. Mater.*, 110–116, 2245–2251. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.2245
8. Ali, F., Chowdary, B.V., Maharaj, J. (2014). Influence of some process parameters on build time, material consumption, and surface roughness of FDM processed parts: Inferences based on the Taguchi design of experiments. *Proceedings of the 2014 IAJC/ISAM Joint International Conference*, ISBN: 978-1-60643-379-9.
9. Rathee, S., Srivastava, M., Maheshwari, S., Siddiquee, A.N. (2017). Effect of varying spatial orientations on build time requirements for FDM process: A case study. *Def. Technol.*, 13, 92–100. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2016.11.006>
10. Wu, J. (2018) Study on optimization of 3D printing parameters. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 392, 062050. doi: 10.1088/1757-899X/392/6/062050
11. Dey, A., Yodo, N. (2019). A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics. *J. Manuf. Mater. Process.*, 3, 64. <https://doi.org/10.3390/jmmp3030064>
12. Properties ABS+ MonoFilament. Available at: <https://monofilament.com.ua/ua/products/standartnye-materialy/abs-plus/abs-plus-bezhevij>.