

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ FDM 3D ДРУКУ НА ПРОЦЕСИ ФОРМУВАННЯ, СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ВИРОБІВ З ПОЛІЛАКТИДУ

О.П. Масючок, М.В. Юрженко, Р.В. Колісник, А.О. Шадрін, В.Ю. Кондратенко, М.Г. Кораб

ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: 4chewip@gmail.com

На основі результатів математичного моделювання та теоретичних досліджень встановлено, що найвпливовішими факторами 3D друку, від яких залежить якість та час формування кінцевих виробів, є: температура філь'єри екструдера, висота шарів, швидкість руху друкуючої головки при формуванні виробів, а також одночасна побудова декількох виробів у межах одного циклу. У роботі було проведено відпрацювання режимів процесу FDM 3D друку та встановлено закономірності впливу згаданих параметрів на структуру та властивості отриманих 3D виробів із полілактиду. Експериментально визначено параметри формування виробів, які забезпечують отримання 3D об'єктів із прогнозованими властивостями – максимальною міцністю (98 % міцності філаменту), високою естетичною якістю (гладкістю поверхні та роздільною здатністю) та виробів з мінімальними часовими вкладеннями при їх виробництві. Бібліогр. 16, рис. 10, табл. 4.

Ключові слова: адитивне формування, технологія FDM 3D друку, полілактид, функціональний 3D виріб, філамент

Вступ. Останнім часом розвиток технологій тривимірного (3D) друку набрав вибухового характеру [1–3]. Серед них одним з найрозповсюдженіших є технологія моделювання методом наплавлення (Fused Deposition Modeling, FDM) [4–6]. З іншого боку, у світі набуває розмаху (з огляду на загострення проблеми забруднення навколишнього середовища) використання полімерних матеріалів, які мають здатність до біодеградації [7]. Серед таких матеріалів особливе місце займає полілактид (PLA) – термопластичний поліефір на основі молочної кислоти, придатний зокрема для пакування харчових продуктів [8, 9]. Створення виробів з такого матеріалу, у тому числі за допомогою 3D друку, є перспективним для цілого ряду промислових галузей. Для проведення досліджень було обрано філамент з PLA компанії MonoFilament [10].

Оскільки FDM 3D друк – це складний процес з великою кількістю параметрів, які можуть впливати на структуру та властивості кінцевих виробів, то на першому етапі було проведено математичне моделювання спрощеного процесу FDM 3D друку з метою зменшення кількості експериментів для визначення його найвпливовіших параметрів [11].

Таким чином, з огляду на результати математичного моделювання, які співвідносні з даними літературних джерел [12, 13], можна припустити, що до основних параметрів процесу FDM 3D друку, які впливають на якість кінцевих виробів, належать:

- температура FDM 3D друку, тобто філь'єри екструдера;
- швидкість руху друкуючої головки при формуванні виробу;
- висота шарів (у певному сенсі об'єм і маса полімеру), що наносяться при формуванні виробу;
- кількість виробів, що формуються за один цикл 3D друку.

Для визначення експериментальним шляхом впливу кожного з цих параметрів FDM 3D друку на якість кінцевих виробів в роботі всі зразки мали форму лопатки для механічних досліджень з розмірами поперечного перерізу найтоншої частини 2×4 мм. Загальний розмір деталі становив 30×6×2 мм. Розташування моделі відносно робочої платформи було обрано у вертикальній орієнтації з-за анізотропії механічних властивостей сформованого 3D виробу по осях X, Y, Z, оскільки міцність зчеплення між шарами може бути співставною, але не вищою за міцність основного матеріалу.

Вплив температури 3D друку на процеси формування та якість кінцевих полімерних виробів. У даній частині роботи проведено експериментальний 3D друк зразків з використанням комерційного філаменту з PLA за п'ятьма різними температурами екструдера – 190, 200, 210, 220 та 230 °C, які знаходяться в температурному діапазоні, рекомендованому для подібних робіт компанією-виробником (190...230 °C). Результати механічних випробувань на одновісний розтяг представлені на рис. 1.

Масючок О.П. – <https://orcid.org/0000-0002-3302-3079>, Юрженко М.В. – <https://orcid.org/0000-0002-5535-731X>, Колісник Р.В. – <https://orcid.org/0000-0002-0493-894X>, Шадрін А.О. – <https://orcid.org/0000-0002-2777-0852>, Кораб М.Г. – <https://orcid.org/0000-0001-8030-1468>

© О.П. Масючок, М.В. Юрженко, Р.В. Колісник, А.О. Шадрін, В.Ю. Кондратенко, М.Г. Кораб, 2023

Відомо, що усадка нагрітого полімеру після охолодження тим сильніша, чим вища температура друку. Як видно з рис. 1, формування виробів з PLA при температурі 200 °C давало можливість піддавати термопластичний полімерний матеріал якомога меншому термічному розширенню. При цьому відбувалося пошарове формування виробу заданої геометричної форми та найвищої механічної міжшарової міцності $\sigma = 52,9$ МПа при міцності самого PLA $\sigma = 57,8$ МПа [14]. За зниженою температури (190 °C) відбувалося формування виробів заданої геометричної форми, однак значення міжшарової міцності становило $\sigma = 48$ МПа, що пояснюється високою в'язкістю розплаву PLA за такої температури та, відповідно, низькою адгезійною здатністю. Друк виробів з підвищеною температурою екструдера 230 °C призводив до незначної деформації та низької міжшарової міцності на рівні $\sigma = 47$ МПа внаслідок перегріву зразків під час їх формування.

Вплив швидкості 3D друку на процеси формування, зовнішній вигляд, структуру та властивості кінцевих полімерних виробів. За технологією FDM 3D друку із полілактиду були отримані зразки при всіх незмінних параметрах формування виробів, що були описані вище і відповідають рекомендованим компанією-виробником, окрім швидкості переміщення головки під час формування виробів. Компанія MonoFilament рекомендує здійснювати формування виробів з PLA пластику зі швидкістю руху друкуючої головки в межах 30...80 мм/с, тоді як інші виробники радять це робити зі швидкістю в межах 40...110 мм/с [10, 15]. З метою обґрунтованого та об'єктивного встановлення впливу різних швидкостей (у межах рекомендованих) на якість отриманих виробів і знаходження оптимальної швидкості, що забезпечує отримання найякіснішого виробу, було проведено формування зразків з інтервалом у 30 мм/с від найнижчої до найвищої рекомендованої межі. Швидкість руху друкуючої головки при формуванні виробів становила 20, 50, 80, 110 мм/с для зразків №№ 1, 2, 3, 4 відповідно. Час, витрачений на формування кожної лопатки, змінювався від 14 до 22

хв у залежності від обраної швидкості формування виробів.

Після проведення досліджень і обробки отриманих даних було встановлено, що швидкість формування виробів в досліджуваних межах і при незмінних інших параметрах друку суттєвим чином не впливає на зовнішній вигляд (рис. 2). Усі сформовані зразки мали задану геометричну форму з чіткими обрисами деталі та візуально високу щільність прилягання нанесених шарів.

Щільну внутрішню будову отриманих зразків та відсутність в них дефектів, які перевищують 5 мкм, демонструють також знімки, отримані при дослідженні виробів за допомогою комп'ютерного томографа та 3D реконструкції їх внутрішньої будови (рис. 3). Встановлено, що внутрішня будова була типовою для всіх зразків, незважаючи на різну швидкість руху друкуючої головки при формуванні виробів. Для прикладу на рис. 3 наведено будову в X, Y, Z площинах зразка, який був сформований при максимальній швидкості 110 мм/с.

Для дослідження впливу швидкості руху друкуючої головки при формуванні зразків на механічні характеристики отриманих виробів були проведені дослідження за допомогою випробування на одинісний розтяг адитивно-виготовлених??

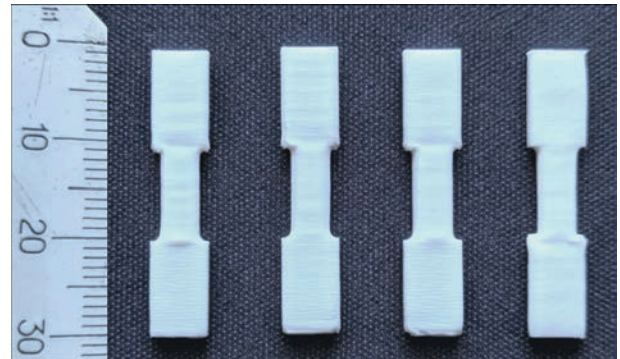


Рис. 2. Зовнішній вигляд зразків №№ 1, 2, 3, 4 (справа наліво)

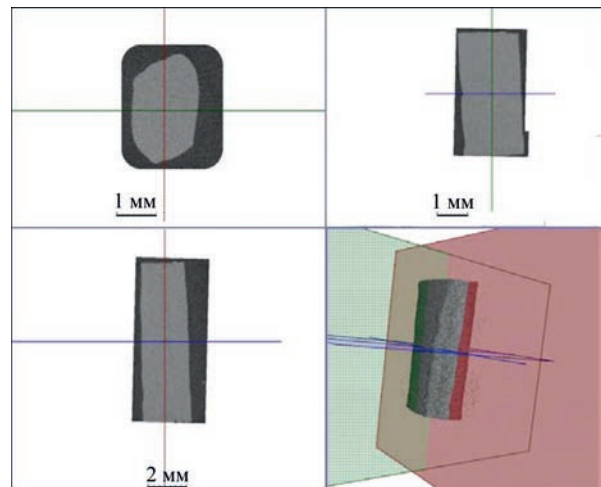


Рис. 3. Зображення внутрішньої будови зразка № 4 в різних площинах, отримане за допомогою 3D комп'ютерної томографії

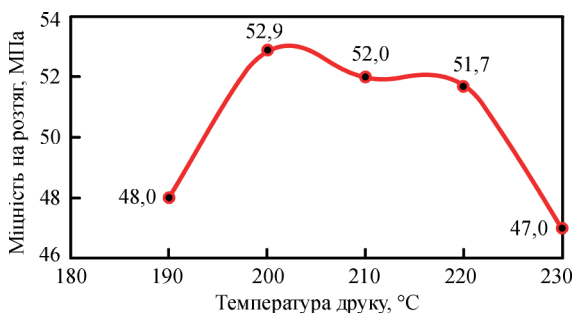


Рис. 1. Залежність механічної міжшарової міцності зразків з PLA від температури їх 3D друку

Таблиця 1. Міцність отриманих виробів в залежності від швидкості та часу їх формування

Номер зразка	Швидкість руху друкуючої головки при формуванні зразків, мм/с	Час формування одного зразка, хв	Міцність зчеплення σ , МПа	Міцність PLA [14]
1	20	22	51,7	57,8
2	50	20	52,9	
3	80	16	56,9	
4	110	14	39,3	

зразків №№ 1–4. Отримані результати за міцністю зчеплення між шарами наведено в табл. 1.

Аналіз результатів механічних досліджень показав, що найкращий результат $\sigma = 56,9$ МПа, який є близьким до табличного значення межі міцності на розтяг PLA $\sigma = 57,8$ МПа, був отриманий у випадку формування 3D виробів зі швидкістю 80 мм/с. Найгірший результат ($\sigma = 39,3$ МПа) показали зразки, формування яких відбувалося з максимальною швидкістю – 110 мм/с. Зразки, що були сформовані зі швидкостями руху друкуючої головки 20 та 50 мм/с, мали середні значення міцності зчеплення між шарами і близькими між собою ($\sigma = 51,7$ та 52,9 МПа відповідно).

З урахуванням того, що при всіх досліджуваних швидкостях руху друкуючої головки при створенні виробів відбувалося формування зразків заданої геометричної форми та візуально однаково високої якості, вибір режиму, що задовольняє потреби споживача/замовника, залежить від додаткових вимог, які висуваються до майбутнього тривимірного об’єкту, а саме його механічних характеристик і часу, який витрачається на формування кожної окремої деталі. Об’єктивно найкращим режимом друку, який дозволяє отримувати вироби з високими показниками механічних характеристик при відносно невисоких часових витратах – 16 хв, є режим формування зразка № 3 (рис. 4).

При збільшенні швидкості руху друкуючої головки при формуванні виробів до 110 мм/с відбувається незначне скорочення часу на формування виробу (14 хв), проте при цьому спостерігається негативний вплив швидкості на механічну міцність отриманого об’єкта.

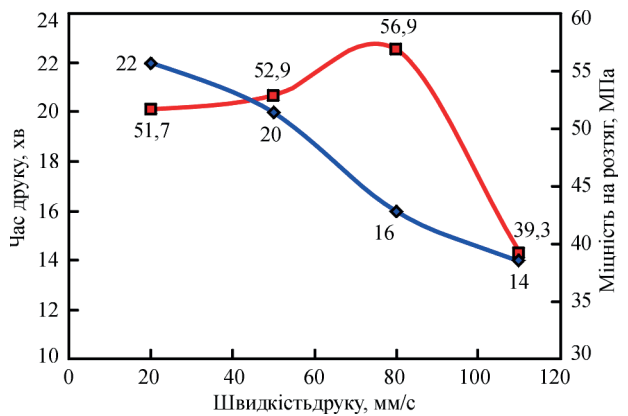


Рис. 4. Залежність часу формування зразків і міжшарової міцності сформованих 3D виробів від швидкості їх формування

При повільнішому русі друкуючої головки (20 і 50 мм/с) отримані зразки мають середню механічну міцність, проте суттєво збільшується час на формування виробів – до 22 та 20 хв відповідно.

Вплив методу адитивного формування 3D виробів на особливості процесу їх виготовлення, структуру та властивості. З метою зниження часових затрат на процес створення 3D принтером виробів існує можливість одночасного послідовного друку декількох моделей в межах одного циклу. Кількість виробів, які можна сформувати одночасно, залежить від характеристик 3D принтера, а саме розмірів його області побудови. Для подальших досліджень впливу одночасного адитивного виготовлення декількох зразків на характеристики одержаних виробів був обраний режим процесу формування зразка № 3 (табл. 1), при використанні якого були отримані зразки найвищої міцності ($\sigma = 56,9$ МПа). У якості моделей для побудови було обрано чотири однакові зразки, що мали ідентичну форму (лопатки), як і в попередньому дослідженні.

Після формування зразків було проведено візуальну оцінку отриманих виробів і встановлено, що їх форма повністю відповідає заданій цифровій моделі, проте структура сформованих деталей менш щільна в порівнянні зі зразком № 3, побудова якого відбувалася окремо (один зразок за один цикл) при тих самих параметрах формування виробів. Результати дослідження за допомогою 3D комп’ютерної томографії внутрішньої структури зразка № 5, формування якого здійснювалося в умовах одночасного друку чотирьох зразків в межах одного циклу, також підтвердили зниження щільності прилягання нанесених шарів у порівнянні зі зразком № 3.

Проведені дослідження міцності зчеплення між шарами отриманих зразків за допомогою стандартизованого випробування на одновісний розтяг показали суттєве зниження міцності ($\sigma = 25$ МПа) у порівнянні з одиничними зразками ($\sigma = 59,6$ МПа), сформованому на такому ж режимі (табл. 2).

Це пояснюється тим, що при формуванні відразу чотирьох деталей паралельно, коли філь’єра екструдера переходить від однієї моделі до іншої, відбувається зниження температури та пластичності верхніх шарів виробу, що обумовлено збільшенням часу охолодження, і наступні шари

Таблиця 2. Міцність 3D виробів і час їх виготовлення в залежності від методу їх формування

Час FDM 3D друку та механічні властивості отриманих зразків	Зразок № 3 (по 1 шт.)	Зразок № 5 (по 4 шт. у межах одного циклу)
Час формування одного зразка, хв.	16	8
Міжшарова міцність σ , МПа	56,9	25
Міцність філаменту PLA, МПа [4]	51	
Міцність PLA, МПа [2]	57,8	

розплавленого матеріалу лягають на основу, що вже частково встигла затвердіти. Це призводить до зниження адгезії та погіршення контактного механічного зчеплення між шарами надрукованого виробу і, як наслідок, зниження міцності. З іншого боку, це дає можливість керувати механічними властивостями виробу при його формуванні 3D друком і отримувати в бажаних місцях деталі задану міцність. Наприклад, для створення у виробі заздалегідь передбачуваної локальної ділянки з послабленими механічними властивостями, по якій буде проходити руйнування деталі при прикладанні до неї силового навантаження, друк необхідно здійснювати у відповідному режимі – з паузами на висоті тих шарів, адгезія між якими має бути прогнозовано невисокою. У програмі для переформатування 3D моделі в керуваний код для 3D принтера передбачено змінювати параметри формування виробів по висоті моделі (наприклад, швидкість руху друку головної при формуванні виробів), у тому числі здійснювати 3D друк з паузами. У випадку розглянутого вище режиму формування виробів по чотири зразка в межах одного циклу, пауза між нанесенням n -го і $n+1$ шару для кожного зразка була однаковою, оскільки моделі на платформі розміщувалися по зовнішнім кутам квадрата, і становила ~ 10 с для ширшої ділянки лопатки і ~ 8 с для вузької її частини.

З іншого боку, якщо використання виробу не передбачає його експлуатацію в умовах значних навантажень, то формування 3D друком відразу декількох деталей дозволяє істотно скоротити час на процес їх виготовлення. Так, в умовах однакових параметрів 3D друку для створення одного зразка, формування якого відбувалося окремо,

було витрачено 16 хв, а для одного зразка, формування якого здійснювалося одночасно з трьома іншими в межах одного циклу, – 8 хв (див. табл. 2).

Після проведення випробувань на одинісний розтяг було зроблено оцінку структури зразків у місцях руйнування. Так, на мікрофотографіях площини руйнування зразка № 5 (рис. 5, а) чітко простежується траєкторія руху друкуючої головки екструдера під час нанесення матеріалу попереднього шару – початок у нижньому правому куті й далі за годинниковою стрілкою по спіралі до центру, що свідчить про те, що руйнування деталі відбулося по міжшаровій області. Для порівняння, на мікрофотографії місця руйнування лопатки, створення якої було здійснене за тих самих параметрах друку, тільки окремо по одній, видно, що її руйнування відбулося не між шарами, а в площині шару (рис. 5, б), що свідчить про вищу адгезію між шарами в сформованому 3D виробі.

Вплив висоти шарів 3D виробів на особливості їх формування, зовнішній вигляд, структуру та властивості. У залежності від застосування того чи іншого FDM 3D принтера та термопластичного матеріалу, а також поставлених задач (отримання 3D деталей з високою точністю та деталізацією, швидкий друк кінцевих виробів великих розмірів тощо) існує можливість створення об'ємних виробів з поверхнями різної якості. У даній роботі вибір параметрів висоти шарів 3D виробу, які безпосередньо впливають на якість отриманих зразків, базувався на крайніх допустимих значеннях (у межах рекомендованих) для 3D принтера CreatorPro та філаменту PLA. При незмінних інших параметрах друку, окрім висоти шарів, яка становила 0,08, 0,10, 0,20, 0,30 та 0,40 мм для зразків №№ 6, 7, 8, 9 відповідно було проведено

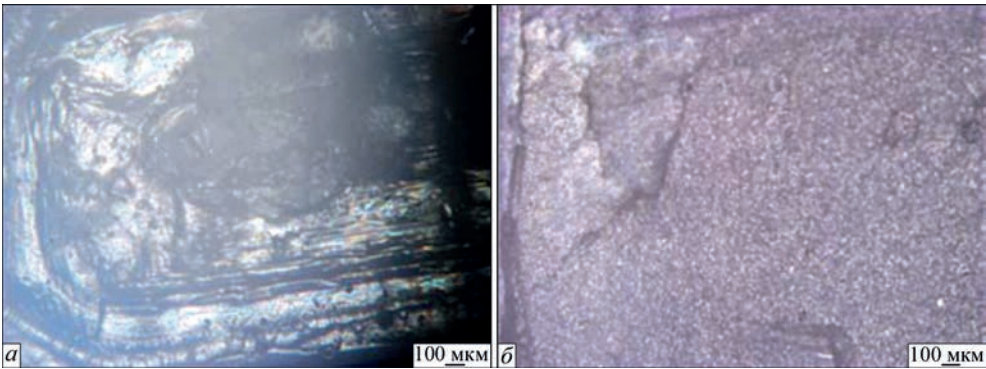


Рис. 5. Морфологія зразків в місцях руйнування після випробувань на одинісний розтяг зразка № 5 (а) і зразка № 3 (б)

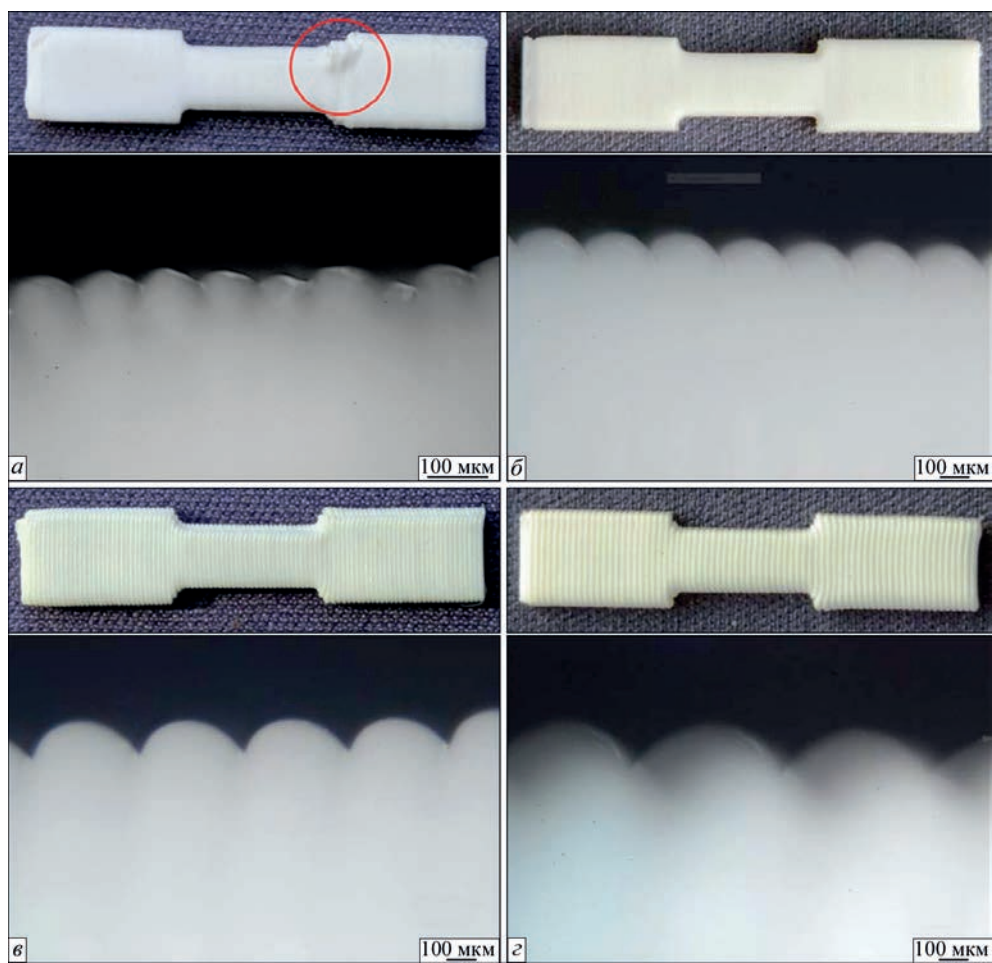


Рис. 6. Фотографії та морфологія зразків різної якості: зразка № 6 з товщиною шарів 0,08 мм (а); зразка № 7 з товщиною шарів 0,20 мм (б); зразка № 8 з товщиною шарів 0,30 мм (в); зразка № 9 з товщиною шарів 0,40 мм (г)

дослідження впливу обраного параметру на зовнішній вигляд, структуру та властивості отриманих виробів.

На рис. 6 наведено фотографії зовнішнього вигляду та мікроструктури зразків №№ 6 (а), 7 (б), 8 (в) та 9 (г), що сформовані за технологією FDM 3D друку у відповідності до параметрів друку. Отримані лопатки в цілому мають задану геометричну форму з гострими краями і чіткими обрисами деталі. Оскільки вироби формуються пошарово, то очевидно, що чим менша висота шару, тим менш помітний перехід між ними, відповідно поверхня об'єкта гладкіша, а його деталі виразніші. Зразки, формування яких здійснювалося за заданою товщиною кожного шару 0,40 та 0,30 мм (рис. 6, в, г), мають нижчу роздільну здатність у порівнянні зі зразками, фіксована висота кожного шару яких складала 0,08 та 0,20 мм (рис. 6, а, б). Останні мають значно менші видимі лінії шарів та гладкішу поверхню. Проте за мінімально можливої висоти шарів можуть бути присутні неточності – артефакти друку (рис. 6, а). У даному випадку такі неточності можуть з'являтися навколо складних елементів, наприклад як в надрукованому зразку, коли його формування здійснювалося на розширення деталі – переході від вузької частини виробу до широкої. При такому переході відбувається адитивне формування в навіс, коли кожна попередня площина сформованої деталі є меншою по відношенню до наступної, яка має формуватися на її основі, і тим складніше сформувати в таких умовах якісний виріб, чим тоншою є висота шарів майбутньої деталі. Дана похибка може бути усунена побудовою підтримуючих конструкцій (у т.ч. розчинних) під нависаючими елементами деталі.

У даному дослідженні було встановлено, що час, витрачений на формування одного зразка з висотою шарів надрукованих виробів 0,08 мм склав 29 хв. У той же час друк ідентичного за формою та розмірами зразка з товщиною шарів 0,40 мм дозволив скоротити часові витрати на його створення до 6 хв. (табл. 3).

Таблиця 3. Час друку отриманих виробів у залежності від товщини шарів 3D моделей

Номер зразка	Висота шарів, мм	Час формування одного зразка, хв
6	0,08	29
7	0,20	12
8	0,30	8
9	0,40	6

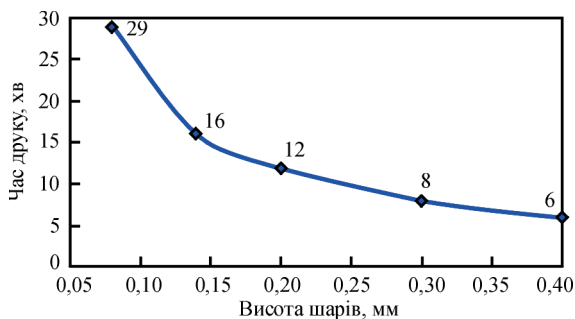


Рис. 7. Залежність часу 3D друку зразків від висоти їх шарів

У ситуації, коли між висотою шарів – вертикальною роздільною здатністю деталі та часом, витраченим на друкування моделі, чітко простежується логічна обернено пропорційна залежність (рис. 7), залежність між роздільною здатністю та міцністю деталі не виглядає так однозначно, оскільки проведені досліді показали, що і при мінімальній, і при максимальній заданій висоті шарів для даного матеріалу та принтеру сформовані вироби мали візуально достатньо високу якість та щільність шарів.

Очевидно, що чим краще шари виробів прилягають і змочують один одного при 3D формуванні, тим вища міцність буде у надрукованої деталі. Питання полягає в тому, яка висота шару при інших рівних налаштуваннях дозволить створити умови для формування шарів з найвищою адгезією між ними.

Оскільки можливість встановлення в програмних налаштуваннях мінімально та максимально можливого значення висоти шару для кожного конкретного філаменту обмежена діаметром філь’ери екструдера 3D принтера, то варто враховувати і його вплив на умови формування виробів, структуру та властивості отриманих виробів. Так, при 3D формуванні зразків з полілактиду з мінімально дозволеною висотою шарів 0,08...0,10 мм на 3D принтері з діаметром філь’ери екструдера 0,4 мм розплавлений полімер, що продавлюється через філь’еру при формуванні виробу, буде сплющуватись, приймаючи овальну форму заданої висоти. Схематично даний процес зображено на рис. 8, а. Адгезія таких шарів очевидно буде значно вище, ніж шарів висотою, наприклад, 0,4 мм (рис. 8, б) за рахунок різної площі дотичних поверхонь шарів. Оскільки розплав полімеру при виході з філь’ери екструдера діаметром 0,4 мм тим менше сплющується, чим ближче до 0,4 мм задана висота шарів, а їх форма при цьому тим ближча до циліндричної, то за рахунок накладання шарів такої форми один на одного при формуванні 3D виробу відбувається зменшення поверхні контакту між ними.

Отже, чим ближче в програмних налаштуваннях виставлений показник висоти шарів майбутнього 3D об’єкту до діаметру філь’ери ек-

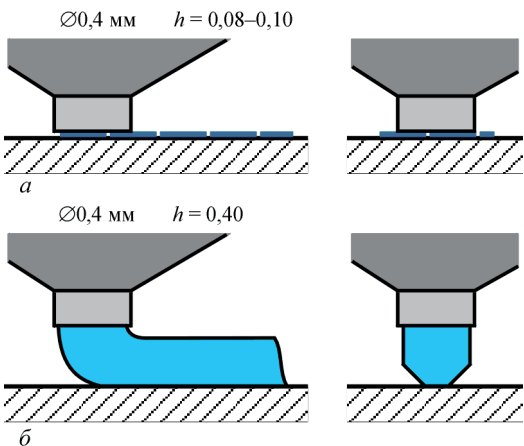


Рис. 8. Схематичне зображення процесу нанесення шарів розплавленого полімеру при формуванні 3D моделі з різною висотою шарів, діаметром 0,4 мм: $h = 0,08 \dots 0,10$ мм (а), $h = 0,40$ мм (б)

струдера, тим округліша форма шарів буде у сформованого виробу. Це, в свою чергу, призводить до ослаблення міжшарових зв’язків.

Для встановлення залежності та повнішої оцінки впливу на механічну міцність висоти шарів сформованих 3D виробів при діаметрі філь’ери екструдера 0,4 мм були проведені механічні випробування на одновісне розтягування зразків №№ 6–9. Для аналізу також були використані дані зі зразка №3, формування якого здійснювалося в ідентичних умовах, відмінним був лише досліджуваний параметр – висота шарів, яка становила 0,14 мм (табл. 4).

Видно, що найвищі показники міжшарової міцності ($\sigma = 56,9$ МПа) було отримано при режимі друку № 3 з висотою шарів 0,14 мм. Однакові результати були отримані у зразків № 7 і 9. Тобто за заданою мінімальною висотою 0,08 мм значення міжшарової механічної міцності виробів було на рівні з виробами, що мали значення висоти шарів 0,2 мм. Проте в цілому простежується закономірність зниження міжшарової міцності отриманих виробів з підвищенням значення висоти їх шарів. Для візуалізації отриманих результатів побудовано графік залежності міжшарової міцності від висоти шарів 3D моделей (рис. 9).

У підсумку можна відзначити, що такий параметр, як висота шарів, має значний вплив на міцність отриманих 3D виробів і час, який витрачається на їх формування, а отже впливає на еко-

Таблиця 4. Міжшарова міцність та час формування виробів у залежності від товщини їх шарів

Номер зразка	Висота шарів, мм	Міжшарова міцність σ , МПа
7	0,08	47
8	0,30	42,5
9	0,20	47
10	0,40	39,6
3	0,14	56,9

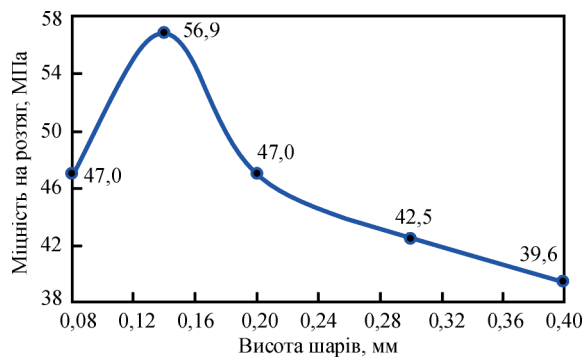


Рис. 9. Залежність міжшарової міцності 3D виробів від висоти їх шарів

номічний показник процесу 3D друку та роздільну здатність поверхні тривимірної деталі.

За необхідності створення виробу з мінімально можливою шаруватістю поверхні та максимально можливою деталізацією його формування варто здійснювати за заданою найменшою висотою шарів, яка можлива при формуванні деталі філь'єрою екструдера 3D принтера відповідного діаметру. Проте необхідно враховувати той факт, що це призводить до суттєвого підвищення часу на створення виробів. Крім того, при мінімальній товщині шарів існує вища вірогідність отримання на поверхні виробу артефактів. З метою досягнення ще більшої мінімізації на поверхні 3D виробів шаруватої структури, яка отримується при 3D друці за технологією FDM, необхідно використовувати філь'єру меншого діаметру, виконувати наступну обробку поверхні готових 3D виробів або застосовувати іншу технологію 3D друку, наприклад, SLA, DLP, які дозволяють створювати моделі з вищою роздільною здатністю.

Для систематизації та узагальнення отриманих даних за результатами проведених досліджень впливу висоти шарів на час формування виробів та їх міцність було побудовано об'єднуючий графік (рис. 10). За його аналізом було проведено визначення оптимального діапазону висоти 3D виробів, при дотриманні якого забезпечується адитивне формування моделей з міжшаровою міцністю на рівні 90 % міцності витратного матеріалу. З огляду на те, що механічна міцність полілактиду за даними з літературних джерел стано-

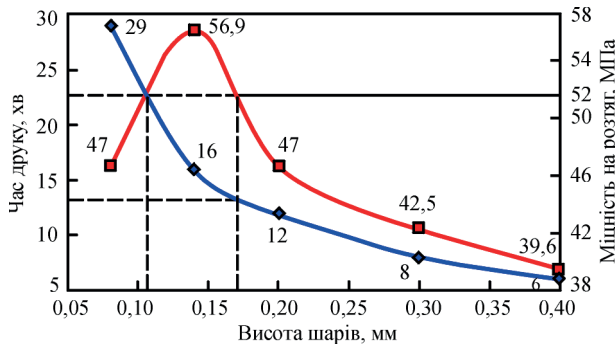


Рис. 10. Залежність часу 3D друку виробів і міжшарової міцності сформованих виробів від висоти їх шарів

вить $\sigma = 57,8$ МПа [14], то на рівні $\sigma = 52$ МПа, що становить 90 % міцності філаменту, по осі «Міцність на розтяг, МПа» графіку була відкладена пряма. Після чого з точок її перетину з кривою розподілу були опущені перпендикуляри на вісь «Висота шарів, мм». Відтак з графіку випливає, що при товщині шарів 0,108...0,173 мм формування 3D об'єктів відбувається з міжшаровою міцністю на рівні 90 % міцності вихідного матеріалу та при середніх часових витратах на друк однієї деталі (13,5...23 хв).

Висновки

1. Було проведено дослідження впливу процесу FDM 3D друку на структуру та властивості полімерного матеріалу філаменту – полілактиду. Показано, що процес 3D друку (його основні параметри: температура філь'єри екструдера; висота шарів, що наносяться при формуванні виробу; швидкість руху друкуючої головки при формуванні виробу та кількість виробів, що формуються за один цикл 3D друку) суттєвим чином впливає на зовнішній вигляд, структуру, механічні властивості та на час, що витрачається на формування виробів.

2. Встановлено раціональний режим адитивного формування виробів, який забезпечує отримання деталей заданої геометричної форми, міжшарової міцності $\sigma = 56,9$ МПа близької до міцності основного матеріалу $\sigma = 57,8$ МПа та невеликих часових витрат (14 хв) на формування однієї деталі.

3. Встановлено режим формування 3D виробів з полілактиду, який забезпечує можливість керування значеннями механічних властивостей виробів під час їх адитивного виробництва та отримувати в бажаних місцях деталі заздалегідь передбачувану міцність, наприклад створювати локальні ділянки з послабленими механічними властивостями, по яких буде проходити руйнування.

4. Встановлено режими процесу формування об'ємних виробів, які дозволяють отримати деталі заданої геометричної форми за максимально короткий проміжок часу (6 та 8 хв). Скорочення часу та, як наслідок, витрат на формування виробів відбувається за рахунок:

- одночасної побудови декількох виробів в межах одного циклу,
- формуванню деталей з висотою шарів, максимально можливою для досліджуваного матеріалу, 3D принтеру та рекомендованих меж.

5. Встановлено режими процесу 3D друку, що дають можливість створювати вироби з максимально можливою їх деталізацією (по осі Z) за рахунок програмного завдання мінімально можливої товщини шарів виробу при 3D друці використуваного термопластичного матеріалу та 3D принтера.

Список літератури/References

1. Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G. et al. (2018) Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
2. Jan Yang Jiquan, Zheng Mei, Yang Jianfei et al. (2016) *Introduction to 3D printing technology [M]*. Nanjing, Nanjing Normal University Press.
3. Shahrubudin, N., Lee, T.C., Ramlan, R. (2019) An overview on 3D printing technology: technological, materials and applications. *Procedia Manuf.*, 35, 1286–1296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>
4. Kristiawan, R.B., Imaduddin, F., Ariawan, D., Ubaidillah, Zainal Arifin (2021) A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*, 11(1), 639–649. DOI: <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0063>
5. Wilson, S., Thomas, R., Mary, N. et al. (2021) Development and fabrication of fused deposition modelling 3D printer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1132, 012019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1132/1/012019>
6. Масючок О.П., Юрженко М.В., Колісник Р.М., Кораб М.Г. (2020) Адитивні технології полімерних матеріалів (Огляд). *Автоматичне зварювання*, 5, 53–60. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.05.08>
7. Sikorska, W., Zięba, M., Musioł, M., Kowalczyk, M., Janeczak, H., Chaber, P., Masiuchok, O., Demchenko, V., Talanyuk, V., Iurzhenko, M., et al. (2020) Forensic Engineering of Advanced Polymeric Materials—Part VII: Degradation of Biopolymer Welded Joints. *Polymers*, 12, 1167. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12051167>
8. Marszałek-Harych, A., Jędrzkiewicz, D., Ejfler, J. (2017) Bio- and chemocatalysis cascades as a bridge between biology and chemistry for green polymer synthesis. *Cell. Mol. Biol. Lett.*, 22(1), 28. DOI: <https://doi.org/10.1186/s11658-017-0061-1>
9. Jalaber, M., Frascini, C., Prud'Homme, R.E. et al (2007) Synthesis and characterization of poly(L-lactide)s and poly(D-lactide)s of controlled molecular weight. *J. of Polymer Science. Part A. Polymer Chemistry*, 45(10), 1944–1955. DOI: <https://doi.org/10.1002/pola.21960>
10. Lunt, J. (1998) Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid polymers. *Polymer Degradation and Stability*, 59(1–3), 145–152. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(97\)00148-1](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00148-1)
11. Стандартні матеріали: PLA [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://monofilament.com.ua/products/standartnye-materialy/pla/>. Standard materials: PLA
12. Сенченко І.К., Юрженко М.В., Червінко О.П. та ін. (2021) Чисельне моделювання напружено-деформованого стану елементів, які виготовляються за допомогою 3D друку. *Автоматичне зварювання*, 8, 29–34. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.08.06>
13. Vega, V., Clements, J., Lam, T. et al. (2011) The effect of layer orientation on the mechanical properties and microstructure of a polymer. *J. Mater. Eng. Perform.*, 20(6), 978–988. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-010-9740-z>
14. Dizon, J.R.C., Espera, A.H., Chen, Q., Advincula, R.C. (2018) Mechanical characterization of 3D printed polymers. *Additive Manufacturing*, 20, 44–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>
15. Garlotta, D. (2001) A literature review of poly (lactic acid). *J. of Polym. and the Environ.*, 9(2), 63–84. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1020200822435>
16. Таблиця стандартних налаштувань для різних видів матеріалів для FDM 3D принтерів [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://pro3d.com.ua/g75854193-plastik-kotushtsi>

STUDY OF THE INFLUENCE OF FDM 3D PRINTING PARAMETERS ON FORMATION PROCESSES, STRUCTURE AND PROPERTIES OF POLYLACTIDE PRODUCTS

O.P. Masyuchok, M.V. Yurzhenko, R.V. Kolisnyk, A.O. Shadrin, V.Yu. Kondratenko, M.G. Korab

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: 4chewip@gmail.com

Based on the results of mathematical modeling and theoretical research works, it was established that the most influential factors of 3D printing, affecting the quality and time of end products formation, are extruder die temperature, layers height, speed of printing head movement during the formation of products, as well as simultaneous fabrication of several products within one cycle. In the work, the modes of the FDM 3D printing process were worked out and the regularities of the influence of the mentioned parameters on the structure and properties of resulted 3D polylactide products were established. The parameters of products formation were experimentally determined, which provide the production of 3D objects with predicted properties: maximum strength (98% of filament strength), high aesthetic quality (surface smoothness and resolution) and products with minimal investments of time during their production. Ref. 16, Fig. 10, Tab. 4.

Keywords: additive formation, FDM 3D printing technology, polylactide, functional 3D product, filament

Надійшла до редакції 23.10.2023



КАТАЛОГ

Зварювального обладнання та матеріалів компанії

ТОВ «ПАТОН ІНТЕРНЕШНЛ»

Київ, 2023, 87 с., <https://paton.ua>

Каталог можна замовити в редакції
журналу «Автоматичне зварювання»

