МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
до виконання лабораторної роботи

«Дослідження якості поверхні та точності розмірів після FDM-друку»

для студентів спеціальності
G9 «Прикладна механіка»
освітньої програми «Технології машинобудування»
усіх форм навчання

2025

Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи «Дослідження якості поверхні та точності розмірів після FDM-друку» для студентів спеціальності G9 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» усіх форм навчання / Укл. ст. викл. Тумарченко Л.О., доц. Пухальська Г.В. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2025 – 15 с.

Укладачі: Тумарченко Л.О., ст. викл. каф. ТАД
Пухальська Г.В., к.т.н., доц. каф. ТМБ

Рецензент: Козлова О.Б., к.т.н., доцент кафедри ТМБ

Відповідальний за випуск Дядя С.І., к.т.н., доцент, зав. каф. ТМБ

Затверджено на засіданні кафедри
«Технологія машинобудування»
Протокол № 1
від 06.08.2025 р.

Рекомендовано до видання
НМК МФ
Протокол № 1 від 26.08.2025 р.

Мета роботи

Ознайомитись з конструкцією FDM-принтера та можливостями FDM-друку; дослідити якість поверхні та точність розмірів після FDM-друку.

2 Необхідне обладнання та матеріали

2.1 3 D-принтер моделі Profi+midi.
2.2 Креслення деталі.
2.3 Програмне забезпечення Slic3rPE для підготовки G-коду.
2.3 Термопластик ABS^{+}.
2.4 Профілограф-профілометр 171621.
2.5 Штангенциркуль.
2.6 Методичні вказівки до лабораторних робіт.

3 Загальні положення та відомості

3.1 Теоретичні відомості про FDM-друк

FDM, також відомий як моделювання методом наплавлення, найпоширеніша технологія 3 D-друку. Компанія Stratasys Inc. у Сполучених Штатах винайшла цей метод у 1990-х роках. Формоутворення з легкоплавких матеріалів методом FDM полягає в тому, що прутковий матеріал (філамент), прикладаючи силу подачі, створювану ведучим механізмом, подають в друкуючу головку, де він нагрівається до температури плавлення і продавлюється через сопло. Друкуюча головка переміщається за заданою програмою траєкторією, наносячи ниткоподібний матеріал на попередній шар, створюючи 3 D-об'єкт шар за шаром (рис. 3.1).

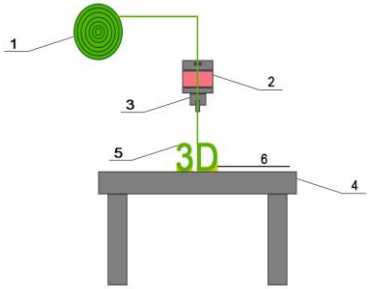

Рисунок 3.1- Зображення схеми FDM [1]: 1-катушка з матеріалом; 2-друкуюча головка; 3-сопло; 4- робочий стіл 3 D -принтера; 5-надрукований об'єкт; 6- підтримки

Процес FDM-друку починається з проектування 3 D-моделі деталі за допомогою програмного забезпечення САПР. 3 D-модель зберігають у файл стандартної мови трикутників (STL).

Файл STL містить дані про геометрію поверхні моделі. Потім файл STL подається в програмне забезпечення, який називають слайсером, де визначаються режимні параметри 3-D друку, нарізка моделі на шари та генерування G-коду. При необхідності в слайсері автоматично генеруються підтримуючі конструкції для фрагментів, що нависають. Згенерований G-код такий самий, як і на верстаті з ЧПК. G-код контролює кількість екструдованого матеріалу, рух друкуючої голівки, напрямок платформи під час друку тощо.

3.2 Параметри процесу FDM-друку

Процес FDM-друку має кілька параметрів процесу, які мають значний вплив на ефективність виробництва та характеристики деталей. Деякі з найпоширеніших параметрів процесу - це повітряний зазор, орієнтація побудови, температура екструзії, щільність заповнення, схема заповнення, товщина шару, кількість оболонок, швидкість друку, орієнтація укладання нитки, температура навколишнього середовища.

3.2.1 Основні параметри процесу.

Повітряний зазор: зазор між двома сусідніми нитками на нанесеному шарі.

Орієнтація побудови: орієнтація побудови визначається як спосіб орієнтування деталі на платформі збірки щодо осей X, Y та Z.

Температура екструзії: температура, при якій нагрівається нитка матеріалу під час 3 D-друку. Температура екструзії залежить від різних аспектів, наприклад, типу матеріалу або швидкості друку.

Щільність заповнення: зовнішні шари тривимірного об'єкту є твердими, однак внутрішня структура, широко відома як заповнення, є невидимою внутрішньою частиною, покритою зовнішнім шаром (шарами), і вона має різні форми, розміри та схеми. Щільність заповнення - це відсоток об'єму заповнення нитковим матеріалом. Міцність і маса деталей FDM залежать від щільності заповнення.

Схема заповнення: різні схеми заповнення використовуються для створення міцної та довговічної внутрішньої структури.

Висота шару: це висота нанесених шарів уздовж осі Z, яка, як правило, є вертикальною віссю машини FDM.

Швидкість друку: це відстань, пройдена екструдером вздовж площини XY за одиницю часу під час екструзії. Час друку залежить від швидкості друку.

Орієнтація укладання нитки: це напрямок осадження нитки по відношенню до осі X будівельної платформи 3 D-принтера.

Важливим фактором, що впливає на якість виготовлення деталі, також, є стабільність температури навколишнього середовища. Різка зміна температури під час друку може призвести до короблення деталі і відставання країв деталі від платформи. Варто зазначити, що характеристики філаментів і 3 D-принтерів можуть відрізнятися в залежності від виробника. Компанії-виробники філамента зазвичай замовляють сировину у вигляді порошків або гранул і не проводять діагностику його складу, що призводить до відмінностей в механічних та технічних властивостях одного і того ж матеріалу.

3.2.2 Матеріали

У процесі FDM-друку деталь виготовляється ниткою (філаментом), яка проходить через сопло. В якості ниток використовують різні термопласти. Нижче описані два найпоширеніших матеріали, які використовуються при друці:

1. Акрилонітрилбутадієнстирол (ABS): ABS, термопластичний та аморфний полімер, є одним із часто використовуваних матеріалів для виготовлення деталей FDM. ABS - це сополімер, виготовлений з акрилонітрилу, бутадієну та стиролу; ударостійкість і в'язкість - дві важливі механічні властивості ABS.

2. Полімолочна кислота (PLA): PLA - один із широко використовуваних термопластів у FDM. Використання PLA зростає, оскільки це біорозкладний термопластик. Він має більш низьку температуру друку, ніж ABS, і не так легко деформується. Ще однією перевагою використання PLA є те, що він не виділяє неприємний запах під час друку (на відміну від ABS). PLA має вищу міцність на розрив, низький відсоток усадки та низьку пластичність порівняно з ABS.

Таблиця 3.1 - Властивості ABS+ та PLA [8]

Властивості	ABS+	PLA
Температура друку, ^{0}C	220-240	200-220
Температура платформи, ^{0}C	100-120	50-70
Густина, г/см^3	1,05	1,24
Температура експлуатації, ^{0}C	-40 +80	-10 +50
Міцність на розтяг, МПа	40	51
Відносне подовження при розриві, %	35	30
Ударна в'язкість непроникна по Шарпі (23^0 C), кДж/м^2	208	102

3.3 Забезпечення якості поверхні і розмірної точності надрукованих деталей

Шорсткість поверхні - широко використовуваний показник якості продукції. У більшості випадків шорсткість поверхні часто використовується як технічна вимога до виробів. Одним з обмежень процесу FDM є погана якість поверхні через вплив ефекту сходів (рис. 3.2), роздільну здатність файлу STL та параметри процесу.

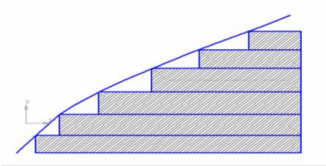

Рисунок 3.2 - Ефект сходів на надрукованих деталях

Вплив ефекту сходів та роздільної здатності файлу STL залежить від складності форми деталі (наприклад, криву поверхню важче отримати, ніж плоску поверхню). Шорсткість поверхні залежить не тільки від форми деталі, але і від встановлення параметрів процесу. Якість поверхні деталі, виготовленої з FDM, можна покращити, вибравши оптимальну комбінацію параметрів процесу. Вища якість поверхні зазвичай зменшує витрати на подальшу обробку. Висока якість поверхні може бути досягнута шляхом вибору низької товщини шару, оскільки це допомагає зменшити ефект сходів на друкованих деталях. Крім товщини шару, для досягнення більшої точності друку бажано мати низьку температуру екструзії та швидкість друку. Висока температура екструзії збільшує плинність ниткових матеріалів і в подальшому призводить до великих відхилень розмірів та шорсткості поверхні [3-4]. Більшість результатів свідчать, що якість поверхні верхньої друкованої поверхні краще, ніж бічної поверхні для будь -якого налаштування параметрів процесу. Тому для процесу FDM рекомендується друкувати найкоротшу сторону деталі у напрямку Z, щоб зменшити загальну шорсткість деталі [5].

Характеристики деталі FDM погіршуються зі збільшенням складності геометрії деталі. Наприклад, якість поверхні та точність розмірів деталі з плоскою поверхнею зазвичай кращі, ніж для деталі циліндричної або пірамідальної форми.

3.4 Конструкція FDM-принтеру

Основні елементи конструкції 3 D-принтеру (рис. 3.3).

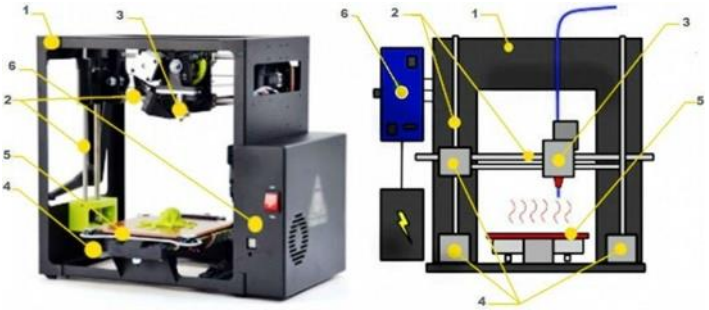

Рисунок 3.3 - Основні елементи конструкції 3 D-принтера [6]

1. Корпус,грає роль скелета для монтажу конструкційних елементів.
2. Напрямні, що здійснюють переміщення друкуючої голівки в заданому просторі.
3. Друкуюча головка (екструдер) - група частин, яка виконує подачу, нагрівання і екструзію витратного матеріалу через сопло на робочу поверхню.
4. Крокові двигуни - елементи конструкції 3 D-принтера, що відповідають за рівномірне переміщення друкуючої головки в заданому просторі.
5. Робочий стіл - будівельна платформа 3 D-принтера, на якій і здійснюється безпосереднє створення тривимірного об'єкта.
6. Електроніка - набір елементів, що відповідає за керування та координацію дій принтера в процесі друку.

Найпоширенішою кінематикою є кінематика 3 D-принтера Prusa Mendel (рис. 3.4). Принтер побудований таким чином, що екструдер рухається по осі X (вправо-вліво) і осі Z (вгору-вниз). Стіл рухається по осі Y (вперед і назад).

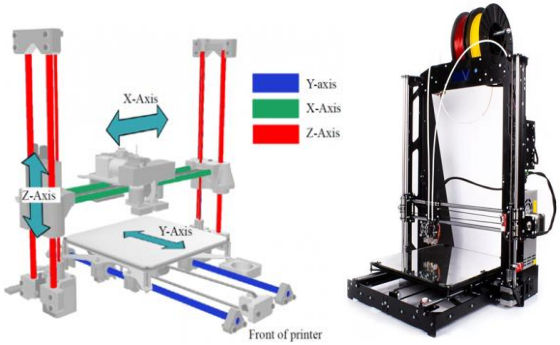

Рисунок 3.4 - Кінематична схема 3 D-принтера [7]

Деталі виготовляються на 3 D-принтері моделі Profi+midi. Розмір робочої зони 3 D-принтера складає 250x250x200 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. Матеріал для виготовлення деталі – ABS+. Час друку однієї деталі – 27 хв. Кількість деталей у партії – 5 штук.

4 Порядок виконання лабораторної роботи

4.1 Ознайомитись з конструкцією та технічними характеристиками 3 D-принтера.
4.2 Вивчити ескіз деталі (рис. 3.5).
4.3 Увімкнути 3D-принтер.
4.4 Включити підігрів столу та екструдера.
4.5 Завантажити філамент в екструдер.
4.6 Підготувати G-код.
4.7 Підключити принтер до комп'ютера або встановити картку пам'яті до принтера.
4.8. Друк об'єкту.

Режими друку:

- висота першого шару - 0,3 мм;
- висота шару - 0,2 мм;
- температура екструзії - 235^{0}С;

- температура стола - 115^0C;
- кількість стінок периметра -2;
- кількість верхніх суцільних шарів - 3;
- кількість нижніх суцільних шарів - 3;
- щільність заповнення - 25%;
- схема заповнення - концентрична;
- швидкість друку - 60 мм/с.

4.9 Відокремити об'єкт від робочого столу.
4.10 При завершенні роботи витягти філамент з екструдера, сховати в zip-пакет, вимкнути принтер.
4.11 Виміряти штангенциркулем розміри втулки (див. рис. 3.5) і занести їх у табл. дод. табл. 1.
4.12 Виміряти висоту мікронерівностей R_{ai} на профілографі-профілометрі в продольному і поперечному напрямках на деталях після FDM-друку. Внести виміряні значення R_{ai} в дод. табл. 2.
4.13 Зробити висновки по точності розмірів і якості поверхні після FDM-друку.
4.14 Оформити звіт. Захистити і здати роботу.

На рис. 3.5 наведено ескіз втулки для 3 D-друку.

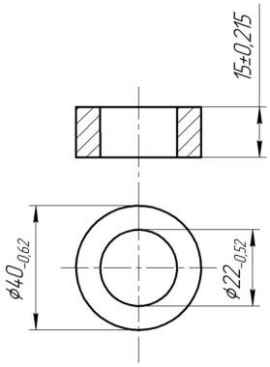

Рисунок 3.5 - Ескіз втулки для 3 D-друку

5 Контрольні питання

5.1 Суть методу FDM-друку.
5.2 Назвіть основні елементи конструкції 3 D-принтеру.

5.3 Назвіть основні параметри режиму друку.
5.4 Назвіть найпоширеніші матеріали, які використовуються при FDM-друці:
5.5 Назвіть прибор, на якому вимірювали шорсткість поверхні.
5.6 Поясніть принцип роботи профілографа-профілометра.
5.7 Назвіть загальні вимоги з техніки безпеки під час роботи на 3D-принтері.
5.8 Назвіть вимоги безпеки під час роботи на 3D-принтері.

6 Вимоги з техніки безпеки

6.1 Загальні вимоги з техніки безпеки під час роботи на 3D-принтері:

6.1.1 До самостійної роботи з 3D-принтером допускаються особи, які досягли 18 річного віку і вивчили інструкцію роботи на 3D-принтері.
6.1.2 Під час роботи на 3D-принтері на людину впливають такі небезпечні та шкідливі фактори:
- випаровування пластику;
- температура;
- шум.

6.1.3 Під час роботи на 3D-принтері не допускається розташування робочого місця в приміщеннях без наявності природної або штучної вентиляції.
6.1.4 Для захисту пластику на котушці від прямих сонячних променів повинні передбачатися сонцезахисні пристрої (штори, плівка з металізованим покриттям, регульовані жалюзі з вертикальними панелями та ін.).
6.1.5 У приміщенні кабінету і на робочому місці необхідно підтримувати чистоту і порядок, проводити систематичне провітрювання.
6.1.6 Про всі виявлені під час роботи несправності обладнання необхідно доповісти керівнику, у разі поломки необхідно зупинити роботу до усунення аварійних обставин. При виявленні можливої небезпеки попередити оточуючих і негайно повідомити керівника.
6.1.7. Утримувати в чистоті робоче місце і не захаращувати його сторонніми предметами.

6.2 Вимоги безпеки перед початком роботи на 3 D-принтері:

6.2.1 Оглянути і переконатися в справності обладнання, електропроводки. У разі виявлення несправностей до роботи не приступати.
6.2.2 Перевірити наявність і надійність захисного заземлення обладнання.
6.2.3 Перевірити стан електричного шнура і вилки.
6.2.4 Перевірити справність вимикачів та інших органів управління 3D-принтером.
6.2.5 При виявленні будь-яких несправностей, принтер не вмикати та негайно довести до відома керівника про це.
6.2.6 Ретельно провітрити приміщення з 3D-принтером, переконатися, що мікроклімат у приміщенні перебуває в допустимих межах: температура повітря в холодний період року - 22-24^{0}С, у теплий період року - 23-25^{0}С, відносна вологість повітря 40-60%.

6.3 Вимоги безпеки під час роботи на 3D-принтері:

6.3.1 Вмикайте та вимикайте 3D-принтер тільки вимикачами, забороняється проводити відключення витягуванням вилки з розетки.
6.3.2 Забороняється знімати захисні пристрої з обладнання і працювати без них, а також торкатися нагрітого екструдера і столика.
6.3.3 Не допускати до 3D-принтера сторонніх осіб, які не беруть участі в роботі.
6.3.4 Забороняється переміщати і переносити 3D-принтер під час друку.
6.3.5 Забороняється під час роботи 3D-принтера пити поруч будь-які напої, вживати їжу.
6.3.6 Забороняється будь-яке фізичне втручання під час роботи 3D-принтера, за винятком екстреної зупинки друку або аварійного вимкнення.
6.3.7 Забороняється залишати увімкнене обладнання без нагляду.
6.3.8 Забороняється класти предмети на 3D-принтер.
6.3.9 Суворо виконувати загальні вимоги з електробезпеки та пожежної безпеки, вимоги цієї інструкції з охорони праці під час роботи на 3D-принтері.

6.3.10 Самостійно розбирати і проводити ремонт 3D-принтера категорично забороняється. Ці роботи може виконувати тільки фахівець.

6.4 Вимоги безпеки після закінчення роботи з 3 D-принтером:

6.4.1 Відключити 3D-принтер від електромережі, для чого необхідно відключити тумблер на задній частині, а потім витягнути штепсельну вилку з розетки.
6.4.2 Зняти і протерти столик 3D-принтера, що охолов до кімнатної температури, чистою вологою тканиною, або промити проточною водою і витерти насухо. Встановити столик назад.
6.4.3 Прибрати робоче місце. Обрізки пластику і брак прибрати в окремий пакет для переробки.
6.4.4 Ретельно провітрити приміщення з 3D-принтером.

Перелік джерел посилання

1. Веб-ресур: https://3d4u.com.ua/ru/blog/post/103-d-pechat-fdm-obyasnenie-prostymi-slovami
2. Polymer Data Handbook, ed. by J. E. Mark, Oxford University Press, New York, 1999.
3. Thrimurthulu, K.; Pandey, P.M.; Reddy, N.V. Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. Int. J. Mach. Tools Manuf. 2004, 44, 585–594.
4. Horvath, D.; Noorani, R.; Mendelson, M. Improvement of surface roughness on ABS 400 polymer using design of experiments (DOE). Mater. Sci. Forum 2007, 561–565, 2389–2392.
5. Montero, M.; Roundy, S.; Odell, D.; Ahn, S.-H.;Wright, P.K. Material characterization of fused deposition modeling (FDM) ABS by designed experiments. Soc. Manuf. Eng. 2001, 10, 1–21.
6. Веб-ресур: https://mplast.by/encyklopedia/3d-printer/
7. Веб-ресур: https://3dtoday.ru/blogs/dagov/3d-printing-for-beginners

ДОДАТКИ

Таблиця 1 – Результати вимірювання розмірів втулки

Номера зразків	Діаметр $22_{-0,52}$, мм	Середнє значення параметра, мм	Діаметр $40_{-0,62}$, мм	Середнє значення параметра, мм	Висота зразка 15±0,215, мм	Середнє значення параметра, мм
1						
2						
3						
4						
5						

Таблиця 2 – Результати вимірювання шорсткості поверхонь втулки

Номера зразків	Ra, мкм вздовж	Середнє значення параметра Ra, мкм	Ra, мкм впоперек	Середнє значення параметра Ra, мкм
1				
2				
3				
4				
5				