

А.С. Кушнірчук, В.П. Ткачук, В.О. Харжевський

Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ FDM ДРУКУ ІЗ ABS ТА СОРЕТ ПЛАСТИКУ

Аддитивні технології є перспективними для машинобудування, вони дозволяють створювати легкі конструкції із заданими характеристиками міцності. Технології 3D-друку, стають все більш популярними через їхню зручність використання та постійне зниження цін на технологічне обладнання і матеріали. Однак зараз доступно мало інформації про механічні властивості деталей, надрукованих за допомогою недорогих 3D-принтерів з відкритим кодом.

Стаття зосереджена на вивченні механічних характеристик деталей, які надруковано FDM технологіями. Показано, що деталі, які виготовлено FDM технологіями з полімерів, здатні витримувати навантаження. Визначено вплив величини внутрішнього заповнення на міцність деталі на розтяг. Побудовано діаграми деформування зразків. З цих діаграм визначено механічні характеристики та характер руйнування. Проводиться порівняльний аналіз механічних характеристик двох матеріалів, а також вплив величини внутрішнього заповнення. В результаті аналізу встановлено, що межа міцності у зразків виготовлених з полімера CoPet вище, ніж у ABS. Зразки з CoPet демонструють пластичну поведінку, тоді як ABS демонструє крихке руйнування. Отримані результати дозволяють конструкторам приймати рішення про друк елементів із заданими характеристиками.

Ключові слова: polymer, FDM printing, tear machine, strength.

S. Kushnirchuk, V. Tkachuk, V. V. Kharzhevskyi

STUDY OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF PARTS OBTAINED BY FDM PRINTING FROM ABS AND COPET PLASTIC

Additive technologies are promising for the field of mechanical engineering as they enable the creation of lightweight structures with specified strength characteristics. 3D printing technologies are becoming increasingly popular due to their user-friendliness and the continual decrease in prices of technological equipment and materials. However, there is currently limited information available regarding the mechanical properties of components printed using inexpensive open-source 3D printers.

The article focuses on studying the mechanical characteristics of components printed using FDM (Fused Deposition Modeling) technologies. It demonstrates that parts manufactured through FDM using polymers are capable of withstanding loads. The influence of infill density on the tensile strength of the components is determined. Deformation diagrams of samples are constructed, from which mechanical properties and the nature of failure are identified. A comparative analysis of the mechanical characteristics of two materials is conducted, along with an examination of the impact of infill density. As a result of the analysis, it is established that the yield strength in samples made from the CoPet polymer is higher than in ABS. CoPet samples exhibit plastic behavior, whereas ABS demonstrates brittle failure. These findings enable designers to make informed decisions regarding the printing of elements with specified characteristics.

Key words: intellectual property, codification, European Union, Code of laws on intellectual property.

Постановка проблеми. Аддитивні технології є перспективними для машинобудування, вони дозволяють створювати легкі конструкції з заданими міцнісними характеристиками. Оскільки інформації про механічні характеристики матеріалів, які використовуються в адитивних технологіях обмаль, кожний розрахунок повинен бути супроводжений експериментальним визначенням цих характеристик. Пропонується експериментальний підхід до визначення механічних характеристик деталей, які надруковано FDM технологіями. Показано, що деталі, які виготовлено FDM технологіями з полімерів, здатні витримувати навантаження. Визначено вплив величини внутрішнього заповнення на міцність деталі на розтяг. Побудовано діаграми деформування зразків. З цих діаграм визначено механічні характеристики та характер руйнування. Проводиться порівняльний аналіз механічних характеристик двох матеріалів, а також вплив величини внутрішнього заповнення. В результаті аналізу встановлено, що межа міцності у зразків виготовлених з полімера CoPet вище, ніж у ABS. Зразки з CoPet демонструють пластичну поведінку, тоді як ABS демонструє крихке руйнування.

FDM друк, як найбільш доступний і поширений вид адитивних технологій, знайшов широке застосування в багатьох сферах. Деталі отримані на принтерах використовуються як ремонтні запасні частини, у якості прототипів, а також як повноцінні функціональні деталі в механізмах. Технологія FDM друку значно спрощує процес виготовлення деталей складної форми, а пост обробка, в тому числі обробка різанням на верстатах забезпечує достатню точність. При цьому залишається актуальним питання механічних властивостей виробу, оскільки процес друку передбачає пошарове наплавлення розплавленого матеріалу (філаменту). Таким чином виріб не

можна розглядати як монолітний об'єкт з певного матеріалу. Для визначення максимальних навантажень, а також можливої пластичної поведінки надрукованих деталей, пропонується виконати дослідження на розривній машині УМ-5. Отримані дані дозволять порівняти властивості найбільш популярних і схожих за характеристиками філаментів, ABS і CoPet (PETG), визначити вплив величини внутрішнього заповнення моделі, характер руйнування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Однією з найбільш часто використовуваних у промислових цілях є технологія Fused Deposition Modelling (пошарового наплавлення), яка може бути використана для отримання деталей з термопластичних матеріалів. Найпоширенішим конструкційним матеріалом є акрилонітрилбутадієнстирол (АБС), який забезпечує відносно хорошу міцність і прийнятну термічну усадку. Це також дозволяє подальшу обробку отриманих елементів (шляхом механічної обробки, покриття або склеювання). Машини для моделювання пошарового наплавлення, порівняно з іншими технологіями адитивного виробництва, мають невеликі розміри та прості в обслуговуванні [1, 3].

Кінцевий продукт, виготовлений за технологією Fused Deposition Modelling, можна охарактеризувати деякими коефіцієнтами, на які впливає багато факторів [4]. На відміну від більшості виробничих технологій, значення параметрів процесу адитивного виробництва можуть бути більш значущими, ніж властивості матеріалу деталі – два різні набори параметрів процесу виготовлення, застосовані до однієї і тієї ж геометрії, можуть призвести до отримання двох деталей з абсолютно різними властивостями. Кожен набір параметрів процесу: орієнтація моделі в робочій камері, товщина шару та спосіб заповнення контуру шару, змусить структуру деталі виглядати по-різному, що призведе до різних значень міцності, точності або якості поверхні.

Дотепер багато вчених досліджували вплив параметрів технологічного процесу на механічні властивості виробів, виготовлених за технологією FDM [4, 5]. Деякі дослідники зосереджувалися на оптимізації обраного параметра по відношенню до певного критерію оцінки, наприклад, часу процесу [6], точності зображення форми [7], якості поверхні [8] та механічних властивостей [9]. Параметром процесу, який найбільш істотно впливає на значення властивостей продукту, є просторова орієнтація продукту в робочій камері в процесі виготовлення [4, 5, 6, 7].

Постановка завдань.

Метою даної роботи було узагальнити комплекс експериментальних досліджень, проведених для отримання знань про вплив ключового параметру адитивного виробництва за технологією FDM – орієнтації продукту в робочій камері під час нанесення шару та сітки заповнення на міцність отриманих деталей.

Викладення основного матеріалу.

ABS (Акрилонітрилбутадієнстирол) -пластик є одним з найпопулярніших в світі матеріалів для 3D друку, тому що він досить міцний, і їм відносно легко друкувати. [3] Він може бути використаний для виготовлення функціональних 3D друкованих деталей і для прототипів. Деталі, надруковані ABS пластиком, можна відшліфувати або згладити за допомогою ацетону. Просунуті користувачі виявили, що видимі ступінчастість шарів, утворену при 3D друку ABS пластиком, можна істотно зменшити, впливаючи на готову деталь парами ацетону. Цей метод дозволяє користувачам отримувати гладкі глянцеві прототипи. Температура склування (температура, при якій пластик починає розм'якшуватися) ABS становить 105 °C. Тому при розробці прототипу деталі необхідно враховувати температуру експлуатації готового виробу. Якщо деталь буде використовуватися при температурі більше 105 °C, ABS пластик буде розм'якшуватися і деформуватися. Усадка ABS пластику може привести до розтріскування або розщепленню шарів у міру збільшення висоти об'єкта. Саме з цієї причини обов'язковою умовою є наявність платформи з підігрівом. Також бажано, щоб у приміщенні підтримувалася постійна температура, і не було протягів, які можуть прискорити охолодження, а, отже, і деформацію матеріалу.

Переваги: ABS - міцний і довговічний матеріал. Володіє хорошою стійкістю до нагрівання та ударів. Матеріал буде жолобитися і гнутися перед тим, як зламатися, довговічність АБС також сприяє його використанню для функціональних деталей.

Недоліки: ABS дуже чутливий до змін температури, тому рекомендуються принтери з столом з підігрівом, а також закритим корпусом. Коливання температури можуть призвести до деформації та появи тріщин на деталях. Закритий корпус допоможе підтримувати задану температуру під час друку. Ще один недолік ABS - його чутливість до УФ-випромінювання. З-за

надмірного впливу ультрафіолетового випромінювання ABS стає крихким, що істотно знижує його міцність і довговічність. Так що краще не використовувати ABS для зовнішніх робіт.

CoPet (Поліетилентерeftалат гліколь) являє собою термопласт, властивості якого роблять його гарним претендентом на функціональні об'єкти. [2] В традиційному виробництві його часто використовують для виготовлення пляшок для води й харчових контейнерів.

Переваги: CoPet вважається харчовою ниткою, отже можливо використовувати його для виготовлення речей, які будуть стикатися з їжею, наприклад, кухонних приладів, контейнерів і т. д. Враховуючи його термостійкість, його можна мити в посудомийній машині (при певній температурі). Матеріал також міцний і володіє високою ударостійкістю.

Недоліки: Філамент CoPet схильний додавати додаткові нитки під час друку, що часто призводить до «волохатих» виробів. Це пов'язано з високою температурою, необхідною для друку, яка дозволяє філаменту вільно текти, але змушує пластик залишати тонкі нитки при переміщенні між двома точками.

Для проведення дослідження використано розривну машину УМ-5 (Рис.4) основні характеристики: Точність вимірювань, % від вимірюваного навантаження ± 1 ; Найбільше статичне навантаження на розтяг, стиснення, поперечний вигин та загин - 50кН; Кількість швидкостей навантаження - 5 Швидкість навантаження, мм/хв 2; 4; 10; 20; 50; Кількість швидкостей холостого ходу - 1 Швидкість холостого ходу, мм/хв. на поперечний вигин – 68мм

Для можливості закріплення досліджуваного зразка на машині, підготовлено зразки спеціальної форми, показано на Рис.1, упори на кінцях дозволяють надійно зафіксувати зразок в оснащенні машини (Рис.4), потоншення по центру – формує досліджуваний переріз площею 0,0004м².

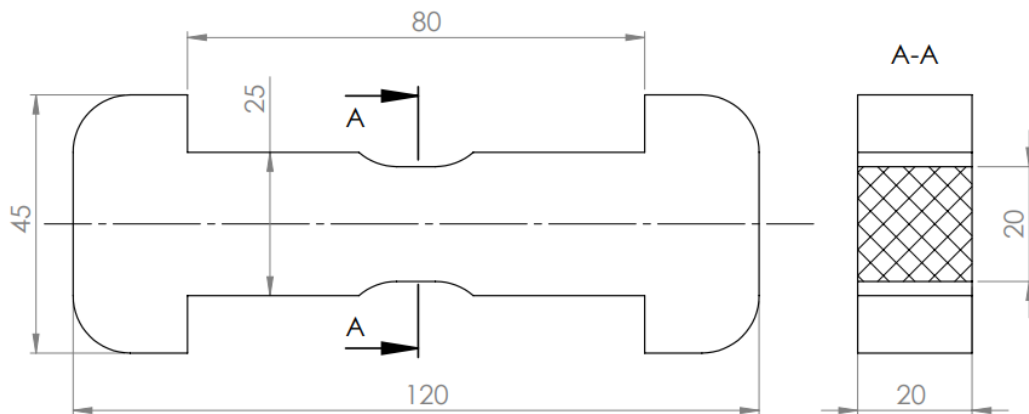


Рис.1. Ескіз зразка

Зразки виготовлено на FDM принтері Artillery sidewinder x1, діаметр сопла – 0,4мм. Режими друку для зразків з CoPet: Температура сопла – 245°C; Температура столу - 90°C; Висота шару – 0,25мм; Швидкість друку – 75мм/с; Кількість зовнішніх шарів – 2. Режими друку для зразків з ABS: Температура сопла – 230°C; Температура столу - 110°C; Висота шару – 0,25мм; Швидкість друку – 80мм/с; Кількість зовнішніх шарів – 2.

Зразки надруковано з кожного матеріалу в трьох варіантах: Заповнення 100%, 50%, 25%, тип заповнення – Rectilinear (шари накладаються з перехрещуванням в 90°).

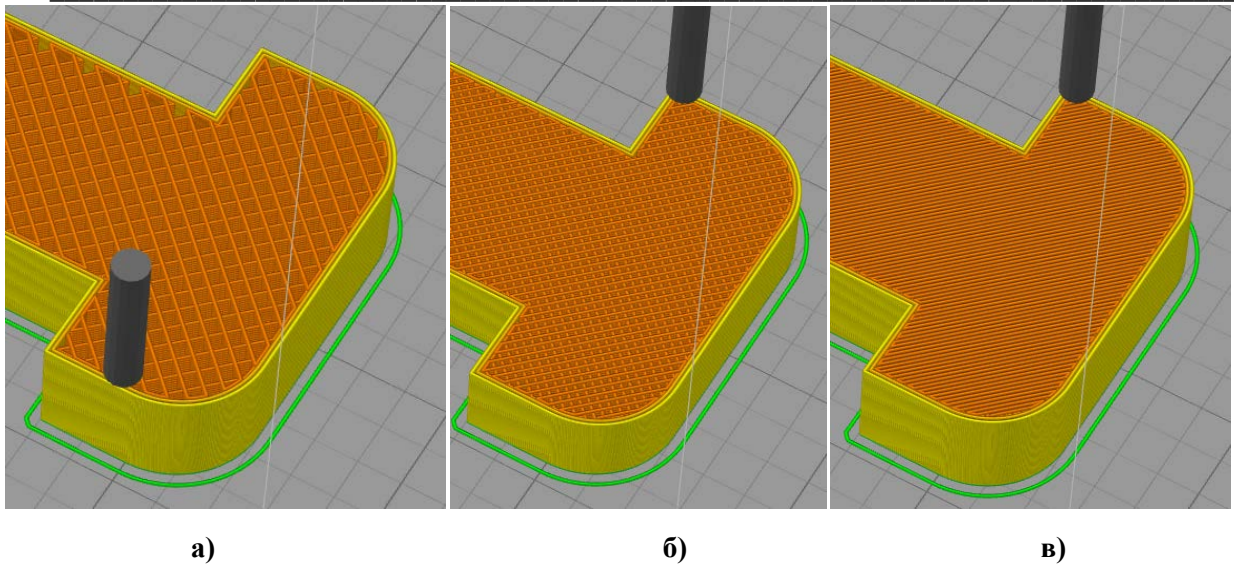


Рис.2. Внутрішня структура досліджуваних зразків при заповненні: а) - 25%; б) – 50%; в) – 100%.

Зразки почергово закріплюються в розривній машині і навантажуються до руйнування. За результатами дослідження формуються діаграми руйнувань для всіх зразків (Рис.6, Рис.7) Діаграми демонструють схожу поведінку зразків з 100% заповненням, на початку навантаження зразки діють за законом Гука, чітко бачимо межу пропорційності, після досягнення межі пружності, помітне незначне збільшення деформації, далі збільшення навантаження і досягнення межі міцності з мінімальною деформацією для ABS (крихке руйнування). Матеріал CoPet з 100% заповненням при досягненні межі міцності, якийсь час опирається руйнуванню, при цьому чітко помітна деформація, зразок демонструє пластичну поведінку. Зразки з внутрішніми пустотами (заповнення 50 і 25%) не демонструють пружних властивостей, з самого початку навантаження помітна деформація зразків. Зразки з ABS з заповненням 50 і 25% при досягненні межі міцності опираються руйнуванню деформуючись.

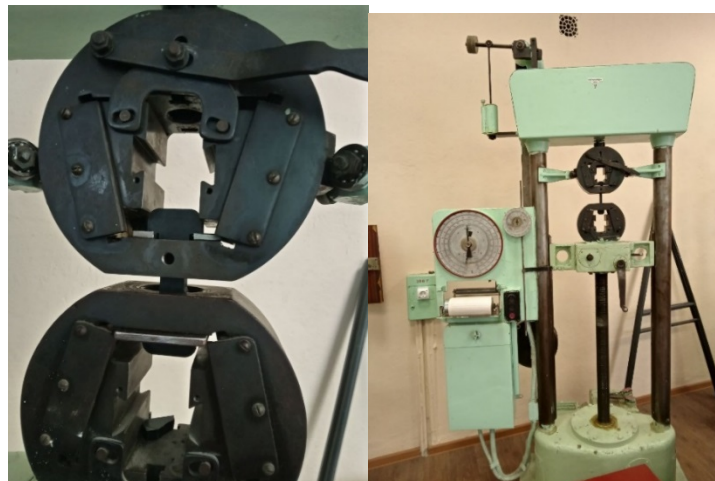


Рис.4. Фіксація зразка в оснащенні машини УММ-5 Рис.5. Розривна машина УММ-5.

Дослідження показало зменшення межі міцності пропорційно зменшенню величини внутрішнього заповнення, при цьому збереження пружних властивостей зразка можливе лише при 100% заповненні для обох досліджуваних матеріалів.

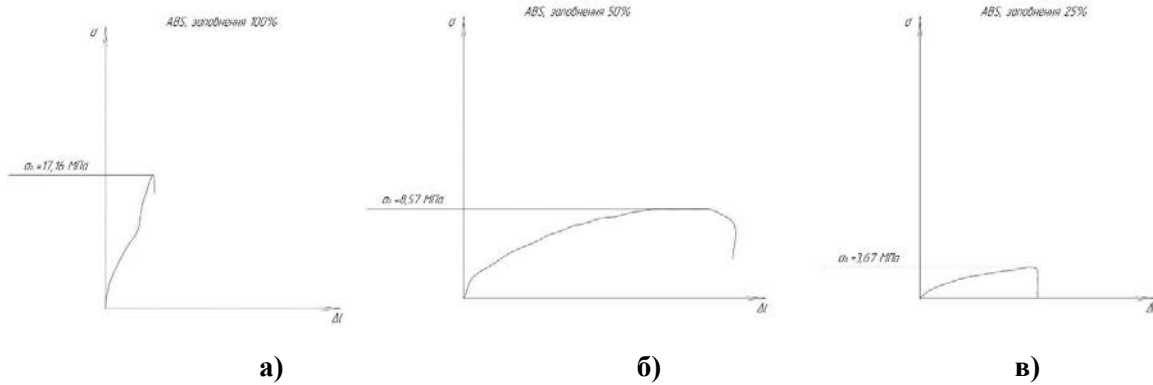


Рис. 6. Діаграми руйнувань зразків з ABS пластику при різних величинах внутрішнього заповнення: а) - 25%; б) – 50%; в) – 100%

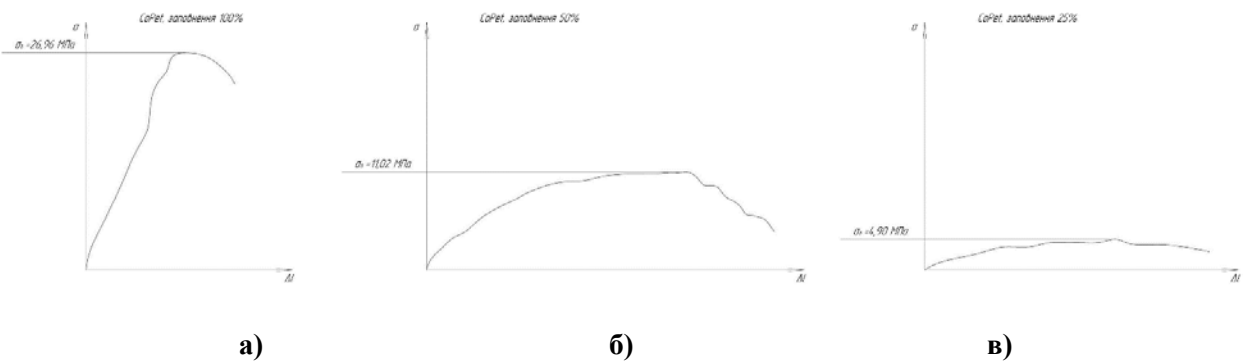


Рис. 7. Діаграми руйнувань зразків з CoPet пластику при різних величинах внутрішнього заповнення: а) - 25%; б) – 50%; в) – 100%

Табл. 1

Максимальне навантаження зразків перед руйнуванням

Матеріал з якого виготовлено зразок	Величина внутрішнього заповнення, %	Максимальне навантаження, кг	Межа міцності, МПа
CoPet	25	200	4,90
ABS+	25	150	3,67
CoPet	50	450	11,02
ABS+	50	350	8,57
CoPet	100	1100	26,96
ABS+	100	700	17,16

Висновки

Наведено методику експериментального аналізу механічних характеристик зразків, надрукованих за допомогою адитивних технологій FDM. Як впливає з експериментальних досліджень, зниження внутрішнього заповнення пропорційно зменшує межу міцності зразка. ABS пластик виявився менш міцним на розрив у порівнянні з CoPet пластиком. При дослідженні діаграм руйнувань помічено пластичну поведінку у зразків з CoPet, тоді як зразки з ABS демонструють крихке руйнування.

Зменшення величини внутрішнього заповнення, знижує витрати часу і матеріалу, що призводить до позитивного економічного ефекту: 100% - час друку 3 год. 20хв, витрата матеріалу 89 грам; 50% - час друку 2 год, витрата матеріалу 51 грам; 25% - час друку 1 год. 20хв, витрата матеріалу 32 грам.

Дослідження допоможе краще підбирати спосіб друку деталей виходячи з вимог міцності. Якщо для деталей висуваються вимоги пружності, дослідження показало, що в такому разі доцільно використовувати лише друк з 100% внутрішнім заповненням.

Список використаних джерел:

1. Gibson I. Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. – New York, 2015. – 498 с. – (Springer).
2. Pająk E., Górski F., Wichniarek R., Dudziak A.: Techniki przyrostowe i wirtualna rzeczywistość w procesach przygotowania produkcji. Promocja 21, Poznań 2011.
3. Górski F., Wichniarek R., and Andrzejewski J., Influence of part orientation on strength of ABS models manufactured using Fused Deposition Modeling technology. Polymer Processing, 9, 2012, 428–435
4. Bellini A., Guceri S., Mechanical characterization of parts fabricated using Fused Deposition Modeling. Rapid Prototyping Journal, 9, 2003, 252–264.
5. Charles Dapogny, Rafael Estevez, Alexis Faure, Georgios Michailidis. 2019. Shape and topology optimization considering anisotropic features induced by additive manufacturing processes. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 344, 626-665.
6. Hardikkumar Prajapati, Darshan Ravoori, Robert L. Woods, Ankur Jain. 2018. Measurement of anisotropic thermal conductivity and inter-layer thermal contact resistance in polymer fused deposition modeling (FDM). Additive Manufacturing 21, 84-90.
7. Cesar Omar Balderrama-Armendariz, Eric MacDonald, David Espalin, David Cortes-Saenz, Ryan Wicker, Aide MaldonadoMacias. 2018. Torsion analysis of the anisotropic behavior of FDM technology. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 96:1-4, 307-317.
8. PLA, ABS, PETG. В чому різниця? 3D4U.COM.UA. URL: <https://3d4u.com.ua/uk/blog/post/81-pla-abs-petg-v-chomu-riznicya> (Дата звернення 28.10.2023)
9. ABS - пластик для 3D друку. Опис і порівняння. 3D4U.COM.UA. URL:<https://3d4u.com.ua/uk/blog/post/4-abs-plastik-dlya-3d-pechati-opisanie-i-sravnienie> (Дата звернення 22.10.2023)
10. Машина випробувальні [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ukrintech.com.ua/ua/mashynu-vyprobuvalni/> (Дата звернення 2.11.2023)