

УДК 539.5

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.79-86](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.79-86)**О. С. Мусієнко**, д-р філос., **О. В. Білий***Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; e-mail: olga.musinko@gmail.com*

Міцність виробів із PLA залежно від щільності заповнення та орієнтації шарів при FDM-друці

У роботі досліджено вплив щільності заповнення та орієнтації шарів на механічні властивості зразків із PLA, виготовлених методом FDM-друку. Проведено повний факторний експеримент і побудовано регресійну модель, що підтверджує визначальний вплив орієнтації шарів на міцність матеріалу. Встановлено, що правильний вибір комбінації параметрів друку дозволяє досягти оптимального балансу між жорсткістю, пружністю та міцністю. Запропоновано оптимальні параметри друку, які забезпечують економію матеріалу до 25% без суттєвих втрат міцності, що робить результати дослідження корисними для практичного застосування у виробництві функціональних деталей методом адитивного виробництва.

FDM-друк, PLA, міцність, щільність заповнення, орієнтація шарів, регресійна модель

Постановка проблеми. Серед технологій адитивного виробництва найбільш поширеним методом є моделювання наплавленням розплавленого матеріалу (FDM-друк). Попри його широке застосування у виготовленні прототипів та функціональних елементів, механічні характеристики готових виробів значно відрізняються від властивостей базового матеріалу. Однією з основних причин є вплив технологічних параметрів, зокрема ступеня заповнення внутрішньої структури виробу та орієнтації шарів під час друку.

Оптимізація цих параметрів дозволяє покращити міцнісні характеристики при мінімальному використанні матеріалу, що особливо актуально для інженерії, біомеханіки, а також легких конструкцій у машинобудуванні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження підтверджують, що механічні властивості FDM-виробів суттєво залежать від щільності внутрішнього заповнення, орієнтації шарів та властивостей полімерної матриці [1]. У роботі [2] показали, що для точного опису механічної поведінки PLA необхідні нелінійні моделі матеріалу, чутливі до зміни інфілу. Подібні результати отримали і у роботі [3], які досліджували еластomers з різними схемами заповнення і довели, що відносна щільність визначає робочий діапазон деформацій.

Напрямок модифікації полімерів також активно розвивається. Зокрема, у роботі [4] описали суміші PP/SEBS, що забезпечують кращий баланс міцності та деформаційних характеристик у порівнянні з вихідним поліпропіленом. У роботі [5] показано, що введення натурального каучуку до PLA підвищує ударну в'язкість і придатність матеріалу для FDM-друку, при цьому вибір патерну заповнення істотно впливає на кінцеву поведінку виробів.

Значний інтерес викликає дослідження впливу орієнтації растрових шарів. Автори роботи [6] довели, що статичні та динамічні властивості ABS-пластиків змінюються залежно від растрового кута, що підкреслює анізотропію, властиву шаруватій структурі виробів. Подібні закономірності простежуються і для PLA.

Окремий напрям становить проектування багатоматеріальних структур. Робота [7] показала, що просторове комбінування «жорстких» і «м'яких» фаз дозволяє раціонально керувати пружними властивостями. У роботі [8] досліджено контроль щільності піноподібних

структур шляхом регулювання температури друку, що відкриває нові можливості для створення енергоабсорбуючих елементів. Аналогічно, у роботі [9] описали стадії деформації гнучких матеріалів із різною відносною щільністю, звертаючи увагу на плато колапсу клітинних структур.

Узагальнено вплив параметрів FDM-друку представлено в монографії [10], де систематизовано роль інфілу, орієнтації, температурного режиму та інших параметрів. Таким чином, попередні роботи доводять необхідність комплексного врахування щільності заповнення, орієнтації шарів і властивостей матеріалу для забезпечення прогнозованих механічних характеристик виробів. Саме ці аспекти й визначають актуальність проведеного у даній роботі експериментального дослідження та побудови регресійної моделі.

Постановка завдання. З метою підвищення ефективності FDM-друку актуальним є встановлення залежності між параметрами друку та механічними властивостями виробів. Завданням даної роботи є дослідження впливу щільності заповнення та орієнтації шарів на міцність PLA-зразків, побудова регресійної моделі для прогнозування властивостей, а також визначення оптимальних параметрів друку з урахуванням міцності та економії матеріалу.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення поставленої мети було проведено повний факторний експеримент за схемою $3^2 \times 3 = 27$ (два фактори на трьох рівнях, по три ітерації кожного випробування), де в якості факторів обрано два ключові параметри FDM-друку: щільність заповнення внутрішньої структури зразка та орієнтацію шарів друку (табл. 1).

Таблиця 1 - Фактори та функції ПФЕ

Змінні фактори ПФЕ						Функція відгуку
Щільність заповнення, x_1			Кут орієнтації друку, x_2			$\hat{y}$
30%	65%	100%	[0]	[45,-45]	[90]	σ_B

Джерело: розроблено авторами

Зразки виготовлялися з полілактиду (PLA), який є одним із найпоширеніших матеріалів для FDM-друку завдяки своїй екологічності, низькій температурі плавлення та задовільним механічним характеристикам.

Для виготовлення використовувались зразки типу 1 (рис. 1) відповідно до стандарту ISO 527-2:2018. Моделі були створені в середовищі CATIA V5, а підготовка G-кодів здійснювалася в програмі UltiMaker Cura. Всі інші параметри друку були зафіксовані з метою виключення впливу сторонніх факторів. Друк здійснювався на принтері Ender 3. Кожен варіант комбінації параметрів був виготовлений у трьох екземплярах, що забезпечує достатню кількість даних для статистичної обробки.

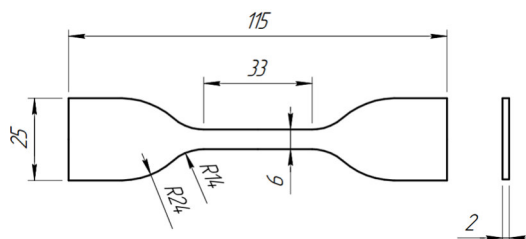


Рисунок 1 - Креслення зразка типу 1

Джерело: розроблено на підставі [11]

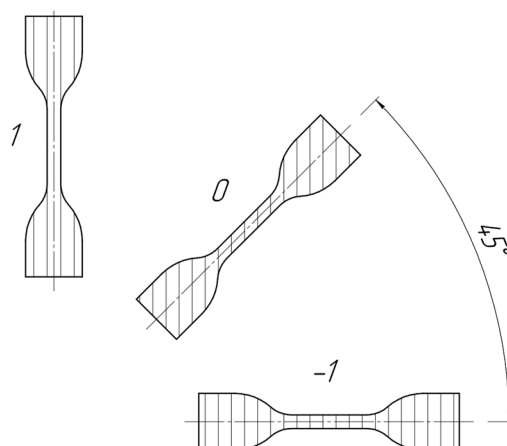


Рисунок 2 - Схема рівнів куту орієнтації шарів друку

Джерело: розроблено авторами

В таблиці 2 представлені кодовані значення факторів обраного повного факторного експерименту [12].

Таблиця 2 - Кодування факторів

Рівень фактору	x_1	x_2	Кодоване значення
Верхній, $x_{i \text{ вер}}$	100%	[90]	+1
Базовий, $x_{i 0}$	65%	[45,-45]	0
Нижній, $x_{i \text{ ниж}}$	30%	[0]	-1

Джерело: розроблено на підставі [12]

Схеми розташування шарів при щільності заповнення 30% наведені на рис. 3.

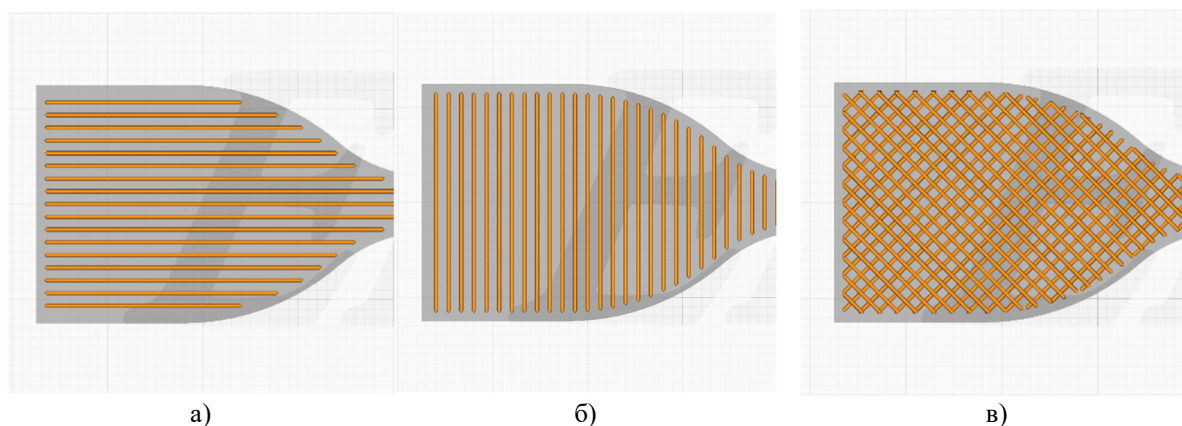


Рисунок 3 – Розташування шарів : а) [90]; б) [0]; в) [45,-45]

Джерело: розроблено авторами

Механічні випробування на розтяг здійснювались на універсальній випробувальній машині TIRATEST 2151 (рис. 4) при швидкості навантаження 2,5 мм/хв. Кожен зразок встановлювався в затискачі таким чином, щоб уникнути його повертання або проковзування, що могло б вплинути на результати випробування. Під час експерименту реєструвалися сила розтягування та відповідне подовження, які згодом були використані для побудови діаграм напруження–деформація. Розрахунок площі поперечного перерізу проводився індивідуально для кожного зразка з урахуванням фактичної ширини і товщини після друку.



а)

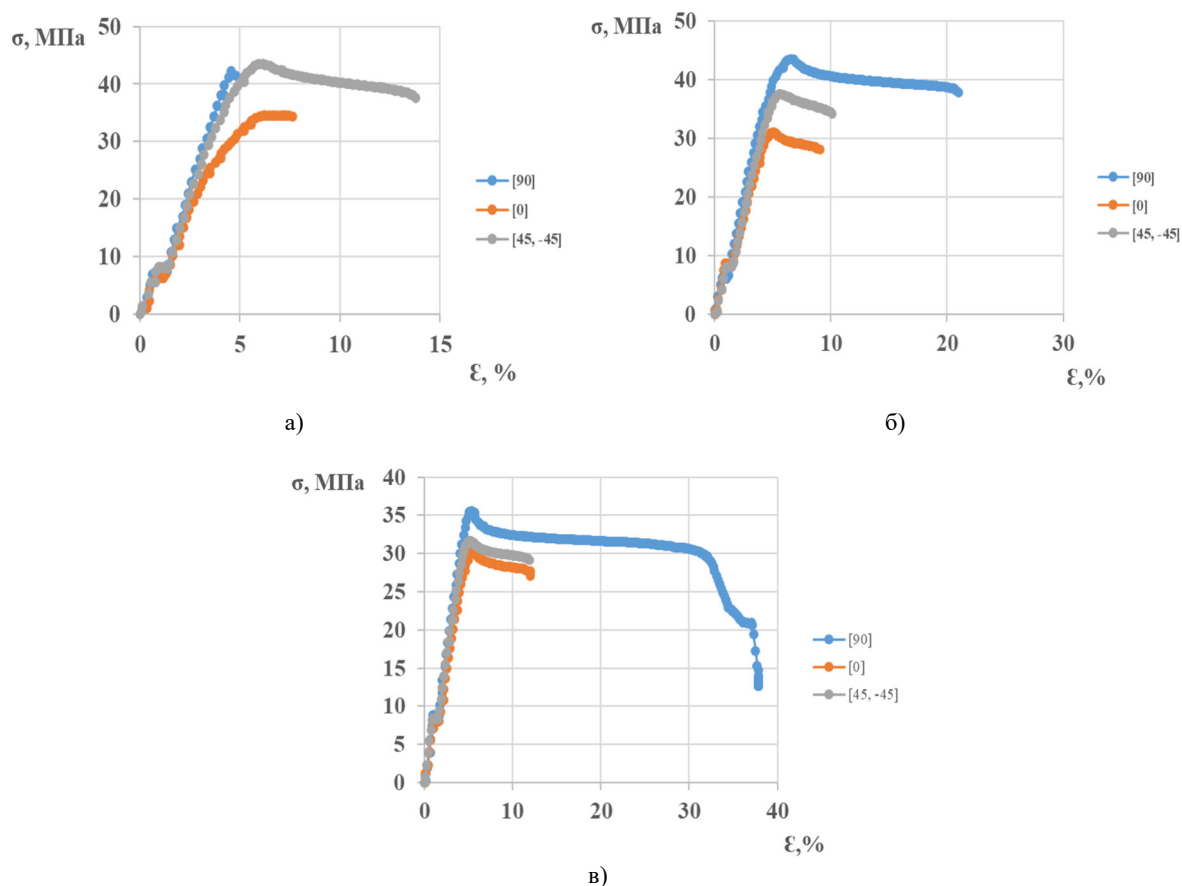
б)

Рисунок 4 – Випробувальна установка TIRATEST 2151:

а) – загальний вигляд машини; б) – зразок в захватах установки

Джерело: <https://www.tira-gmbh.de/en/>

Отримані діаграми напруження–деформація (рис. 5) дали змогу визначити межу міцності при розтягуванні, відносне подовження при розриві, а також проаналізувати поведінку матеріалу в робочому діапазоні (до 5% деформації).



а)

б)

в)

Рисунок 5– Діаграма розтягу зразків з заповненням:

а – 100%, ; б – 65%, в – 30%

Джерело: розроблено авторами

Характер руйнування зразків із різними параметрами друку наведено на рисунку 6.

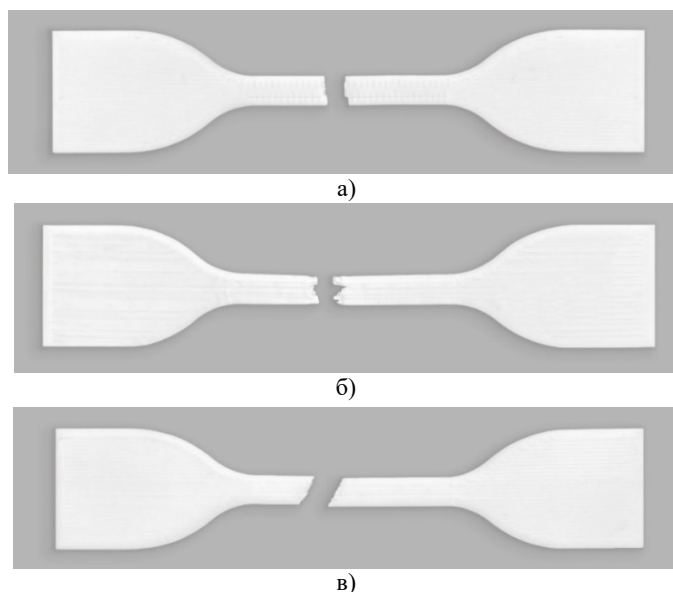


Рисунок 6 – Зразки після руйнування при різних параметрах друку: а) щільність 65%, орієнтація 0°; б) щільність 35%, орієнтація 90°; в) щільність 100%, орієнтація ±45°

Джерело: розроблено авторами

Спостерігалось, що при зростанні щільності заповнення від 30% до 65% підвищення міцності становить не більше 1%, тоді як перехід від 65% до 100% забезпечує приріст до 41%. Це свідчить про нелінійний характер впливу щільності заповнення. Зі свого боку, орієнтація шарів мала більш виражений ефект. Найбільшу міцність показали зразки, надруковані в орієнтації 90°, а найменшу – при 0°. Варто зазначити, що при заповненні 100% результати для всіх орієнтацій були більш наближеними.

Особливу увагу приділено аналізу деформаційної поведінки у межах до 5% відносної деформації, що є характерною для конструкцій, що не зазнають руйнування, а лише пружно працюють під навантаженням. У цій зоні більшість зразків демонстрували типовий для термопластів ефект початкового м'якшення. Найкращу стабільність у робочій зоні деформації продемонстрували зразки з орієнтацією ±45°, що поєднують достатню жорсткість із помірною податливістю.

На основі отриманих експериментальних даних було побудовано регресійну модель, яка описує залежність відносного подовження при розриві від двох факторів. Для цього числові значення факторів були закодовані: щільність заповнення позначена як -1 (30%), 0 (65%), +1 (100%); орієнтація шарів як -1 (0°), 0 (±45°), +1 (90°). Регресійна модель має вигляд:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_1 x_2 + b_4 \cdot x_1 z_1 + b_5 \cdot x_2 z_1 + b_6 \cdot z_1 + b_7 \cdot z_2 + b_8 \cdot z_1 z_2 \quad (1)$$

Коефіцієнти моделі визначалися методом найменших квадратів. Значущість коефіцієнтів перевірялась за допомогою критерію Стюдента, а адекватність моделі – за критерієм Фішера, отримали:

$$\hat{y} = (\sigma_b) = 25,653 + 0,11x_1 + 0,083x_2 \quad (2)$$

Обчислення показали, що модель є статистично достовірною на рівні довіри 95%. Для перевірки моделі було додатково виготовлено контрольний зразок з параметрами, що не входили до основного плану експерименту (щільність 75%,

орієнтація 30°). Похибка між передбаченим та експериментальним значенням не перевищила 7%, що підтверджує високу точність побудованої моделі.

Порівняння отриманих експериментальних значень (табл. 3) з теоретичними прогнозованими показує допустимі відносні відхилення [12].

Таблиця 3 – Порівняння експериментальних значень з прогнозованими

N_2	x_1	x_2	$y = \sigma_B^{\text{експ}}, \text{МПа}$			$y_{\text{ср}} = \sigma_B^{\text{експ}}, \text{МПа}$	$\hat{y} = \sigma_B^{\text{прог}}, \text{МПа}$	$\delta, \%$
1	1	1	42.12	41.85	40.68	41.5487	44.33616	6.7
2	1	-1	34.58	36.51	38.21	36.4341	36.8828	1.2
3	1	0	43.61	44.81	43.19	43.8679	40.60948	7.4
4	0	1	41.95	41.58	43.34	42.2905	40.40567	4.5
5	0	-1	30.96	30.50	30.41	30.6244	32.95231	7.6
6	0	0	37.20	37.18	36.86	37.0777	36.67899	1.1
7	-1	1	36.05	35.39	36.24	35.8907	36.47518	1.6
8	-1	-1	30.17	30.05	30.72	30.3113	29.02182	4.3
9	-1	0	32.61	31.54	32.05	32.0657	32.7485	2.1

Джерело: розроблено на підставі [12]

Для додаткової перевірки регресійної моделі було проведено ще один дослід з проміжними значеннями ступеня заповнення та кутом орієнтації друку (табл. 4).

Таблиця 4 – Результати перевірки додатковим дослідом

N_2	$A, \%$	$\theta, ^\circ$	$y = \sigma_B^{\text{експ}}, \text{МПа}$	$\hat{y} = \sigma_B^{\text{прог}}, \text{МПа}$	$\delta, \%$
10	75	30	38.93443	36.55976	6.1

Джерело: розроблено авторами

За результатами розрахунку побудовано діаграми залежності міцності від орієнтації шарів для експериментальних даних та для значень, отриманих за регресійною моделлю (рис.7).

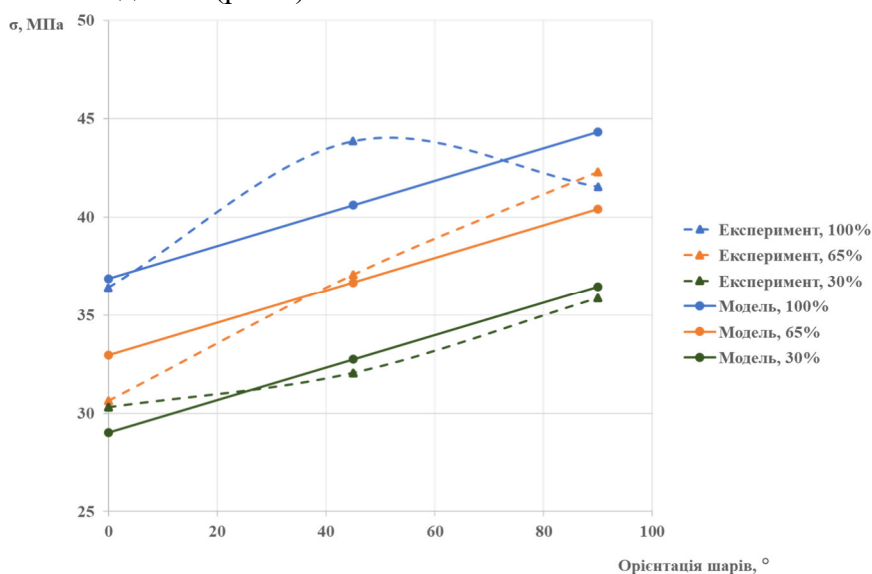


Рисунок 7 – Залежність міцності від орієнтації шарів для різних рівнів щільності заповнення: порівняння експериментальних результатів та даних регресійної моделі

Джерело: розроблено авторами

Отримані результати мають практичне значення для інженерів, які займаються розробкою функціональних деталей методом FDM-друку. Модель дозволяє передбачити поведінку виробу без фізичного друку зразка, що дає змогу економити час і матеріал. Зокрема, використання 65% заповнення з орієнтацією $\pm 45^\circ$ забезпечує майже ті самі характеристики, що й 100% при орієнтації 90° , але зі зменшенням обсягу використаного PLA до 25%.

Висновки. Проведене дослідження дозволило встановити характер впливу параметрів FDM-друку, зокрема щільності заповнення та орієнтації шарів, на механічну поведінку зразків із PLA. Встановлено, що орієнтація шарів відіграє визначальну роль у формуванні міцнісних властивостей: зразки, надруковані з орієнтацією шарів 90° , демонстрували найвищу межу міцності, тоді як орієнтація 0° значно знижувала опір до розтягування. Щільність заповнення також впливає на результат, однак у межах від 30% до 65% спостерігається лише незначне зростання міцності, тоді як збільшення до 100% забезпечує суттєвий приріст – до 41%, що свідчить про нелінійну залежність цього параметра.

Аналіз поведінки зразків у межах робочої зони деформації (до 5%) показав, що всі зразки мають типовий для термопластів ефект м'якшення на початковій ділянці діаграми напруження–деформація. Найбільш збалансовані характеристики жорсткості та податливості були виявлені у зразків з орієнтацією $\pm 45^\circ$, що робить їх придатними для деталей, які працюють під змінними або помірними навантаженнями.

На основі отриманих експериментальних даних було побудовано регресійну модель, яка є статистично достовірною та дозволяє здійснювати прогнозування відносного подовження при розриві залежно від параметрів друку. Перевірка моделі на контрольному зразку підтвердила її адекватність із похибкою, що не перевищує 7%. Практичне значення моделі полягає в можливості швидкого підбору оптимальних режимів друку без потреби у трудомістких експериментах.

Загалом, результати дослідження дозволяють зробити висновок про доцільність поєднання середньої щільності заповнення (наприклад, 65%) з орієнтацією шарів $\pm 45^\circ$, що забезпечує економію матеріалу до 25% без істотного погіршення міцнісних характеристик. Запропонований підхід може бути використаний у практиці інженерного проектування виробів, виготовлених методом FDM-друку, з урахуванням конкретних вимог до міцності та ресурсу роботи.

Список літератури

1. Tymoshenko O., Musiienko O., Demeshko Y. Technological damage to structures made by 3D printing. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2025. Vol. 1, № 11(42). P. 101–107. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2025.11\(42\).1.101-107](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2025.11(42).1.101-107).
2. Afshar R., Jeanne S., Abali B. E. Nonlinear Material Modeling for Mechanical Characterization of 3-D Printed PLA Polymer With Different Infill Densities. *Applied Composite Materials*. 2023. Vol. 30. P. 987–1001. <https://doi.org/10.1007/s10443-023-10122-y>.
3. Akhondi S., Christopher-Denny Matte, Tsz Ho Kwok. A study on mechanical behavior of 3D printed elastomers with various infills and densities. *Manufacturing Letters*. 2023. Vol. 35, Supplement. P. 592–602. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.08.035>.
4. Banerjee S. S., Burbine S., Kodihalli Shivaprakash N., Mead J. 3D-Printable PP/SEBS Thermoplastic Elastomeric Blends: Preparation and Properties. *Polymers*. 2019. 11(2):347. <https://doi.org/10.3390/polym11020347>.
5. Fekete I., Ronkay F., Lendvai L. Highly toughened blends of Poly(lactic acid) (PLA) and natural rubber (NR) for FDM-based 3D printing applications: The effect of composition and infill pattern. *Polymer Testing*. 2021. Vol. 99. 107205. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107205>.
6. Galeja M., Hejna A., Kosmela P., Kulawik A. Статичні та динамічні механічні властивості АБС-пластиків, надрукованих на 3D-принтері, як функція растрового кута. *Materials*. 13(2), 297.
7. Mirzaali M. J., Caracciolo A., Pahlavani H., Janbaz S., Vergani L., Zadpoor A. A. Multi-material 3D printed mechanical metamaterials: Rational design of elastic properties. *Applied Physics Letters*. 2018. Vol. 113 (24). 241903. <https://doi.org/10.1063/1.5064864>.
8. Pawar A., Ausias G., Corre Y.-M., Grohens Y., Férec J. Mastering the density of 3D printed thermoplastic elastomer foam structures with controlled temperature. *Additive Manufacturing*. 2022. Vol. 58. 103066. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103066>.
9. Płatek P., Rajkowski K., Cieplak K. et al. Deformation process of 3D printed structures made from flexible material with different values of relative density. *Polymers*. 2020. 12(9):2120. doi.org/10.3390/polym12092120.
10. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Технології адитивного виробництва. Springer Science + Business Media. Нью-Йорк, США, 2015. 510 с.

11. ДСТУ EN ISO 527-3:2017. Пластмаси. Визначення властивостей під час розтягування. Частина 3. Умови випробування для плівок і листів.
12. Білий О. В., Мусієнко О. С. Вплив параметрів 3D-друку на міцність виробів з PLA-пластику. *Інновації молоді в машинобудуванні 2025 : матеріали конференції*. 2025. URL: <https://scholar.google.com/scholar?oi=bibs&cluster=14690560341301090166&btnI=1&hl=uk>.

References

1. Tymoshenko, O., Musiienko, O., & Demeshko, Y. (2025). Technological damage to structures made by 3D printing. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 1, 11(42), 101–107. [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2025.11\(42\).1.101-107](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2025.11(42).1.101-107).
2. Afshar, R., Jeanne, S., & Abali, B. E. (2023). Nonlinear Material Modeling for Mechanical Characterization of 3-D Printed PLA Polymer With Different Infill Densities. *Applied Composite Materials*, 30, 987–1001. <https://doi.org/10.1007/s10443-023-10122-y>.
3. Akhondi, S., Christopher-Denny, Matte, & Tsz Ho Kwok. (2023). A study on mechanical behavior of 3D printed elastomers with various infills and densities. *Manufacturing Letters*, 35(Suppl.), 592–602. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.08.035>.
4. Banerjee, S. S., Burbine, S., Kodihalli Shivaprakash, N., & Mead, J. (2019). 3D-Printable PP/SEBS Thermoplastic Elastomeric Blends: Preparation and Properties. *Polymers*, 11(2), 347. <https://doi.org/10.3390/polym11020347>.
5. Fekete, I., Ronkay, F., & Lendvai, L. (2021). Highly toughened blends of Poly(lactic acid) (PLA) and natural rubber (NR) for FDM-based 3D printing applications: The effect of composition and infill pattern. *Polymer Testing*, 99, 107205. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107205>.
6. Galeja, M., Hejna, A., Kosmela, P., & Kulawik, A. (2020). Statyczne i dynamiczne mechaniczne właściwości ABS-plastyku, nadrukowanych na 3D-printer, jak funkcja rastrowego kuta. *Materials*, 13(2), 297 [in Ukrainian].
7. Mirzaali, M. J., Caracciolo, A., Pahlavani, H., Janbaz, S., Vergani, L., & Zadpoor, A. A. (2018). Multi-material 3D printed mechanical metamaterials: Rational design of elastic properties. *Applied Physics Letters*, 113(24), 241903. <https://doi.org/10.1063/1.5064864>.
8. Pawar, A., Ausias, G., Corre, Y.-M., Grohens, Y., & Férec, J. (2022). Mastering the density of 3D printed thermoplastic elastomer foam structures with controlled temperature. *Additive Manufacturing*, 58, 103066. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103066>.
9. Platek, P., Rajkowski, K., Cieplak, K., et al. (2020). Deformation process of 3D printed structures made from flexible material with different values of relative density. *Polymers*, 12(9), 2120. doi.org/10.3390/polym12092120.
10. Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Tekhnologii adytyvnogo vyrobnytstva*. Springer Science + Business Media. New York, USA. 510 s. [in Ukrainian].
11. DSTU EN ISO 527-3:2017. (2017). *Plastmasy. Vyznachennia vlastyvostei pid chas roztrahuiannia*. Part 3. Umovy vyprobuvannia dlia plivok i lystiv. *Derzhavnyi standart Ukrainy* [in Ukrainian].
12. Bilyi, O. V., & Musiienko, O. S. (2025). Vplyv parametriv 3D-druku na mitsnist vyrobiv z PLA-plastyku. *Innovatsii molodi v mashynobuduvanni 2025: Materialy konferentsii*. <https://scholar.google.com/scholar?oi=bibs&cluster=14690560341301090166&btnI=1&hl=uk> [in Ukrainian].

Olha Musiienko, PhD tech. sci., **Oleksandr Bilyi**

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Strength of PLA Products Depending on Fill Density and Layer Orientation in FDM Printing

The aim of this research is to evaluate the influence of infill density and layer orientation on the mechanical performance of PLA parts produced via Fused Deposition Modeling (FDM) and to create a predictive regression model for parameter optimization. The study is relevant due to the growing use of additive manufacturing in producing functional components where both mechanical strength and material efficiency are critical. Identifying optimal combinations of printing parameters enables manufacturers to achieve desired properties without unnecessary material consumption.

A full factorial experiment with two factors was carried out: infill density (30%, 65%, 100%) and layer orientation (0°, ±45°, 90°). Tensile specimens of type 1 according to ISO 527-2:2018 were printed on an Ender 3 printer with fixed process settings. Mechanical tests were conducted on a TIRATEST 2151 universal testing machine at a crosshead speed of 2.5 mm/min. The results showed that layer orientation had a more pronounced effect on strength than infill density: the 90° orientation produced the highest tensile strength, while 0° yielded the lowest. Increasing infill density from 30% to 65% had little effect, but raising it to 100% improved strength by up to 41%. In the working deformation range (up to 5%), ±45° orientation offered the best balance of stiffness and elasticity.

A linear regression model describing the relationship between elongation at break and the two factors was developed and validated using statistical criteria, with a prediction error not exceeding 7%. Based on the findings, a 65% infill combined with ±45° layer orientation can achieve strength comparable to 100% infill with 90° orientation, while reducing material use by up to 25%. The developed model can guide the selection of FDM printing parameters to reduce production costs and time, making it applicable to the engineering design of functional PLA components intended for moderate mechanical loads.

FDM printing, PLA, strength, infill density, layer orientation, regression model

Одержано (Received) 27.08.2025

Прорецензовано (Reviewed) 30.09.2025

Прийнято до друку (Approved) 28.10.2025