

УДК 539.3

С. Л. Куцик*

асистент, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5330-5911>

Кафедра прикладної математики та механіки

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

О. А. Мікуліч

д.т.н., професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-596X>

Кафедра прикладної математики та механіки

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

Д. А. Гусачук

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5899-1706>

Кафедра матеріалознавства

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

*автор-кореспондент, e-mail: sergiyk88@gmail.com

Вплив технічних умов виробництва на механічні властивості 3D друківаних полімерних елементів

Цитувати як:

Куцик С.Л., Мікуліч, О. А., Гусачук, Д.А., (2025). Вплив технічних умов виробництва на механічні властивості 3D друківаних полімерних елементів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 132-142. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-13](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-13)

© 2025, Куцик С.Л., Мікуліч, О. А., Гусачук, Д.А

Анотація. У даній статті представлено результати дослідження впливу виробника полімерної нитки на механічні характеристики зразків, виготовлених методом FDM (Fused Deposition Modeling) 3D-друку. Метою роботи було визначення залежності міцнісних властивостей надрукованих деталей від якості сировини різних виробників філаменту при використанні однакових параметрів друку. В експерименті використано чотири групи зразків одного типу і розміру, надруковані з філаменту від різних виробників на одній і тій самій 3D-принтерній установці з фіксованими технологічними параметрами.

Проведено механічні випробування на розтяг повздовжньою силою на універсальній випробувальній машині МІІ-40КУ з фіксацією показників напружено-деформованого стану зразка. З метою кількісної оцінки механічної міцності визначено межу пружності та текучості при розтягуванні, модуль Юнга, пружну та пластичну деформацію в зоні текучості. Отримані результати засвідчили істотну варіативність механічних властивостей залежно від постачальника філаменту, що зумовлено відмінностями у складі полімеру, ступені висушування, домішках та технології виготовлення філаменту.

Дослідження демонструє критичне значення вибору якісного матеріалу при проектуванні та виготовленні відповідальних деталей методом FDM-друку. Отримані дані можуть бути використані користувачами 3D друку, для яких важливо в своїй роботі підібрати не лише необхідний вид філаменту, а й навіть

виробника продукт якого задовільнить його потреби при виготовленні відповідальних деталей. Отримані результати демонструють важливість попереднього тестування матеріалів перед їх використанням у відповідальних виробках. Крім того, графіки навантаження й деформації підтвердили аналітичні спостереження та дозволили глибше зрозуміти поведінку кожного типу зразків під впливом силових навантажень.

Ключові слова: 3D друк, філамент, технологія виготовлення, міцнісні характеристики.

Вступ

Упродовж останніх років технології 3D-друку набули стрімкого розвитку і сьогодні активно використовуються не лише в прототипуванні, а й у малосерійному виробництві деталей для медицини, авіації, машинобудування та побутових потреб. Одним із найпоширеніших матеріалів для друку є термопластики, які завдяки своїй доступності, простоті обробки та прийнятним механічним характеристикам стали основою для виготовлення широкого спектра виробів.

У процесі виробництва важливу роль відіграє не лише тип пластику, а й сам виробник матеріалу, оскільки якість сировини, домішки, параметри екструзії, контроль вологості та інші технологічні чинники безпосередньо впливають на механічні властивості кінцевого виробу. Часто користувачі 3D-принтерів, працюючи з одним і тим самим типом матеріалу (наприклад, PLA чи PETG), спостерігають суттєві відмінності в міцності залежно від бренду філамента. Саме це стало відправною точкою для нашого дослідження.

У даній роботі проведено порівняльний аналіз механічних характеристик одного й того ж виду пластику, надрукованого з однаковими параметрами, але від різних виробників. Для цього було побудовано графіки залежності напруження від деформації (σ – ϵ) і розраховано ключові показники, зокрема: модуль Юнга [1], межу пружності та текучості [2], пружну і пластичну деформацію [3].

Цей аналіз дає змогу виявити, наскільки дотримання виробником технічних умов при виготовленні пластику впливає на механічну поведінку матеріалу і дозволяє свідомо обирати філамент для задач, де потрібна точність, міцність або навпаки – еластичність.

Аналіз літературних досліджень та постановка проблеми

У контексті швидкого розвитку технологій адитивного виробництва, дедалі більше уваги приділяється вивченню механічних характеристик друкованих виробів. Різні дослідники відзначають, що на властивості надрукованих зразків впливають численні фактори – від параметрів друку (температура, швидкість, висота шару) до якості та складу філаменту [4], [5].

Авторами в попередніх дослідженнях [6] було помічено що, при однакових розмірах, параметрах друку зразків, виробника матеріалу, існує певна розрізненість результатів, що й змусило провести дане дослідження.

У роботах [7], [8] наголошується, що різні виробники одного й того ж типу пластику можуть мати варіації у вмісті домішок, чистоті сировини та ступені осушення пластику. Що безпосередньо впливає на міцність, пружність і міжшарову адгезію надрукованих зразків. В роботі [9] також наводиться аналіз фізико-механічних характеристик PLA-філаментів від кількох брендів, де різниця в модулі Юнга сягала 30%, навіть за однакових умов друку.

У статті [10] окремо розглядається вплив виробника філаменту на межу текучості, показуючи, що деякі зразки втрачають здатність витримувати навантаження в межах пружної деформації вже при 50% від максимального навантаження, тоді як інші демонструють стійкість до майже повного руйнування без втрати форми.

Таким чином, літературні джерела підтверджують, що дослідження залежності механічних властивостей від виробника пластику є актуальним і необхідним, особливо у випадках, коли кінцевий виріб має працювати в умовах навантажень. Аналіз напружено-деформованих діаграм дозволяє не лише об'єктивно порівняти матеріали, але й рекомендувати певні бренди для специфічних завдань.

Метою даної роботи є дослідження впливу вибору виробника на поведінку одного й того ж матеріалу в умовах навантаження стиску.

Методика експериментальних досліджень

У даній роботі досліджуються механічні характеристики чотирьох груп пластиків, кожен з яких виготовлений іншим виробником. Аналіз виконується на основі напружено-деформованих діаграм та розрахованих характеристик міцності.

Друк зразків проводився на 3D-принтері «Bambu Lab P1S» з такими параметрами друку: швидкість друку – 50 мм/с; щільність заповнення – 100%; висота шару – 0,08 мм, висота початкового шару – 0,2 мм. Випробування на стиск проводилось на дослідній машині МІ-40КУ при швидкості навантаження 1 мм/хв. Для вивчення впливу масштабних факторів дослідження проводилося для трьох груп зразків: 20×20×20 мм та однієї 10×10×10 мм. А саме: Виробник 1 [11]; Виробник 2 [12]; Виробник 3 [13]; Виробник 4 [14].

У зв'язку з тим, що зразок [14] мав удвічі менші лінійні розміри, для порівняння з рештою результатів було введено емпіричний коефіцієнт корекції $k=1.4$, що враховує вплив масштабу на точність, адгезію шарів та похибку деформації.

Експериментально виявлено, що існує суттєвий вплив масштабних факторів на механічну поведінку тіл при деформуванні: зменшені геометричні розміри вплинули на результати механічного випробування: отримано нижчі значення модуля Юнга, межі текучості та пружності цього зразка. Оцінка впливу масштабних факторів проводилася наступним чином. Оскільки зразок має вдвічі менші лінійні розміри, його площа та довжина в $4\times$ і $2\times$ разів менші відповідно. Це дає змогу оцінити приблизну похибку, спричинену розміром.

Результати та обговорення

У результаті проведених експериментальних випробувань на стиск було отримано напружено-деформаційні характеристики для чотирьох груп зразків від різних виробників. Хоча всі зразки були надруковані при однакових параметрах друку, результати продемонстрували суттєві відмінності в механічних властивостях, що вказує на те, яку важливу роль відіграє виробник матеріалу та особливості складу філаменту.

Отримані значення експериментальних досліджень співставлені та занесені до таблиці 1.

Таблиця 1. Отримані числові значення механічних характеристик

Виробник	Модуль Юнга, МПа	Пружна деформація, %	Пластична деформація в зоні текучості, %	Межа пружності, МПа	Межа текучості, МПа
Виробник 1	1445	7,5	21	69	74
Виробник 2	717	4,15	19	67,5	73
Виробник 3	1355	9,9	27,3	74	75
Виробник 4	867	8,1	25,5	59	75

Аналізуючи отримані результати, можна зробити ряд висновків щодо кожного зі зразків. Зразки Виробника 1 продемонстрували найвищу жорсткість: модуль Юнга становив 1445 МПа, що приблизно вдвічі більше, ніж у Виробника 2. Така висока жорсткість вказує на значну щільність і структурну однорідність матеріалу. Проте зразки цього виробника характеризувалися відносно невеликою пружною деформацією (7,5%) та обмеженою пластичністю (21%), що може свідчити про крихку поведінку матеріалу після перевищення межі пружності.

Зразок Виробника 2 виявився найм'якшим серед досліджуваних, з модулем Юнга лише 717 МПа, що на 47% менше, ніж у Виробника 3.

Пружна деформація становила 4,15%, а пластична – 19%. Така комбінація свідчить про те, що матеріал деформується під навантаженням більш плавно, проте менш здатний зберігати форму після вивантаження. Попри відносно низький модуль Юнга, межа текучості була близькою до інших зразків – 73 МПа, що може свідчити про використання присадок, які знижують жорсткість, але зберігають міцність.

Найбільш збалансовані характеристики були виявлені у зразках Виробника 3, що є найвищими значеннями серед усіх зразків. Ці зразки також мали найвищі деформаційні показники, що є на ~30% більше, ніж у Виробника 1. Це свідчить про підвищену енергопоглинальну здатність матеріалу та його адаптивність до навантаження без втрати цілісності. Такий полімер може бути рекомендований для функціональних деталей, що працюють під змінним навантаженням.

Зразки Виробника 4 мали зменшені геометричні розміри, тому їх результати аналізувалися з урахуванням масштабного коефіцієнта. Відповідно скориговані результати показали модуль Юнга 867 МПа, що є середнім значенням серед інших виробників. Проте ці зразки виявилися досить деформативними: пружна деформація становила 8,1%, пластична – 25,5%, що майже дорівнює значенням зразків Виробника 3. Межа текучості була такою ж високою, як і у кращих зразків. Таким чином, незважаючи на меншу жорсткість, зразки Виробника 4 проявили себе як механічно витривалі й здатні до значного навантаження без руйнування, що може бути результатом кращої адгезії між шарами або пластичних модифікаторів у складі філаменту.

Таким чином, можна стверджувати, що виробник філаменту має вирішальний вплив на механічні властивості зразків, навіть за однакових умов друку. Різниця в модулі Юнга між найжорсткішим і найм'якшим зразком склала понад 100%, що є критичним для технічних застосувань. Міцність усіх зразків є порівнюваною, однак деформаційна поведінка суттєво різнилася. Це свідчить, що модифікації складу філаменту (наприклад, пластифікатори або інші добавки) можуть змінювати механічну відповідь, не змінюючи міцності.

Аналізуючи отримані результати можна зробити наступні практичні рекомендації щодо сфери їх застосування:

- зразки Виробника 3 мають найкращий баланс жорсткості та деформаційної здатності, що робить їх найперспективнішими для відповідальних деталей з умовами експлуатаційного навантаження;
- зразки Виробника 1 найбільш жорсткі, але схильні до крихкого руйнування, що обмежує їхнє використання в умовах ударних або циклічних навантажень;

– матеріали Виробника 2 та 4 можуть бути рекомендовані для гнучких або амортизуючих елементів, де допустима значна пластична деформація без втрати функціональності.

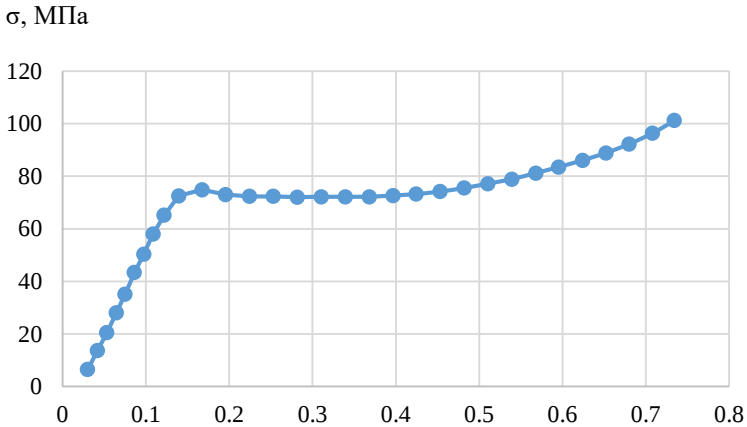


Рис. 1. Графік напружень для зразків Виробника 1 ϵ , мм

Для кращого розуміння поведінки зразків під навантаженням та підтвердження отриманих числових результатів, нижче наведено графіки залежності напруження від деформації для кожної групи матеріалів рисунок 1–4. Ці діаграми наочно демонструють особливості механічної поведінки: характерну жорсткість, межу пружності, текучість та здатність до пластичної деформації.

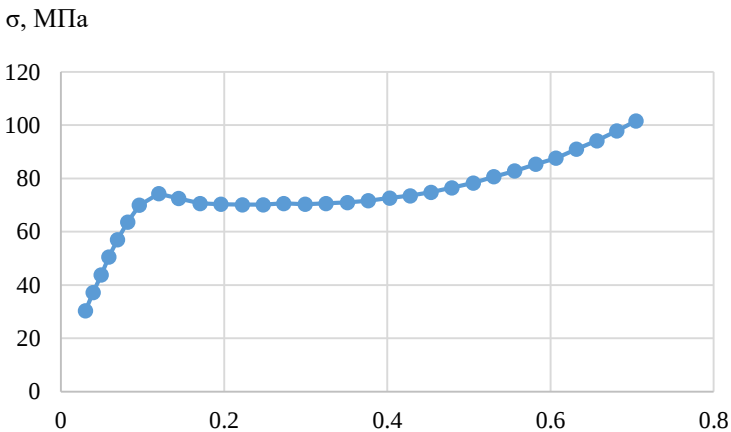


Рис. 2. Графік напружень для зразків Виробника 2 ϵ , мм

Графіки свідчать про чітко виражену межу пружності у Виробника 3, менш виражену — у Виробника 2. Це може бути корисним при розрахунках

σ , МПа

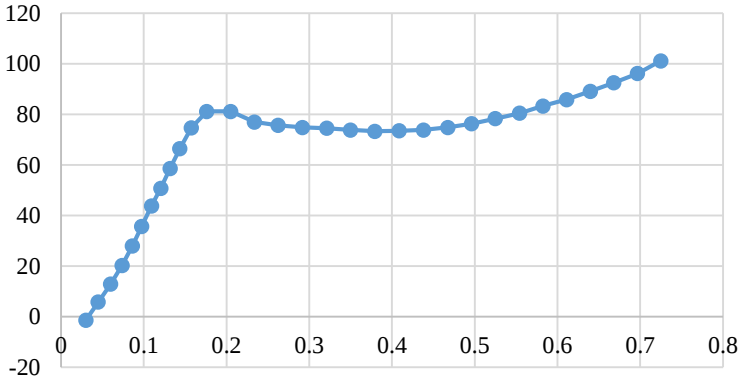


Рис. 3. Графік напружень для зразків Виробника 3
елементів, які працюють у пружному режимі.

σ , МПа

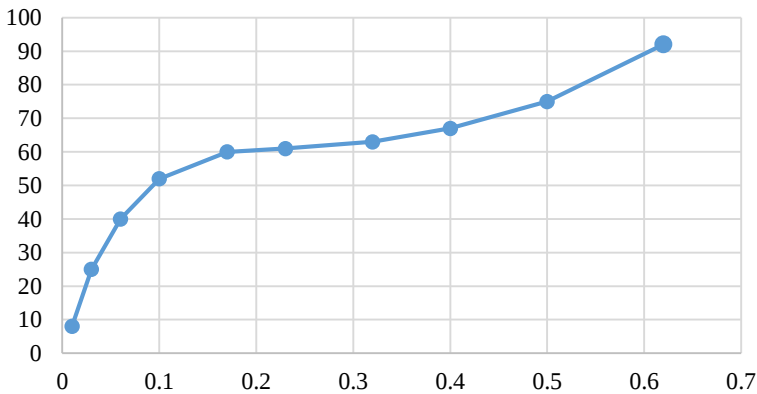


Рис. 4. Графік напружень для зразків Виробника 4
 ϵ , мм

Усі отримані графіки σ – ϵ мають характерні лінійні ділянки пружності, з подальшим переходом у зону текучості, що підтверджує достовірність випробувань. Робота наочно показує, що при виборі матеріалу

для критичних механічних задач важливо враховувати не лише тип пластику, але й виробника.

Висновки

Проведене дослідження підтвердило, що навіть за однакових умов 3D-друку механічні властивості матеріалів можуть істотно відрізнятися залежно від виробника. Такі відмінності проявляються у жорсткості, пружності та здатності до пластичної деформації зразків.

Деякі матеріали показали кращу міцність, інші – вищу гнучкість, що свідчить про необхідність ретельного вибору філаменту під конкретні технічні потреби. Наприклад, одні зразки виявилися більш придатними для статичних і жорстких деталей, інші – для виробів, які можуть деформуватися в роботі або витримувати динамічні навантаження.

Отримані результати демонструють важливість попереднього тестування матеріалів перед їх використанням у відповідальних виробках. Крім того, графіки навантаження й деформації підтвердили аналітичні спостереження та дозволили глибше зрозуміти поведінку кожного типу зразків під впливом силових навантажень.

Загалом, дослідження дає змогу сформулювати практичні рекомендації для інженерів і користувачів 3D-друку при виборі матеріалів залежно від функціонального призначення деталей.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. URL:https://en.wikipedia.org/wiki/Young%27s_modulus (дата звернення: 01.05.2025).
2. URL:[https://en.wikipedia.org/wiki/Yield_\(engineering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Yield_(engineering)) (дата звернення: 01.05.2025).

3. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Deformation_\(engineering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Deformation_(engineering)) (дата звернення: 01.05.2025).
4. Tymrak B. M., Kreiger M., Pearce J. M. “Mechanical properties of components fabricated with open-source 3D printers under realistic environmental conditions.” *Materials & Design*, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038>
5. Torrado A. R., Roberson D. A., Wicker R. B. “Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing.” *Additive Manufacturing*, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.02.001>
6. Kutsyk S., Mikulich O., Feshchuk Y. Experimental Study of Material Anisotropy Effect for 3D Printing Elements. *Materials Science Forum*, 1141, (2024) 63–72. <https://doi.org/10.4028/p-Xen66g>
7. Spoerk M., Holzer C., Gonzalez-Gutierrez J. “Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: A review on challenges, improvements, and applications.” *Polymers*, 2020. <https://doi.org/10.1002/app.48545>
8. Goh G. D. et al. “Process–structure–properties in polymer additive manufacturing via material extrusion: A review.” *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2020. <https://doi.org/10.1080/10408436.2018.1549977>
9. Ziemian C. W., Sharma M., Ziemian S. “Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling.” *Mechanical Engineering*, 2012. <https://doi.org/10.5772/34233>
10. Torrado Perez A. R. et al. “Impact of material and process parameters on the mechanical properties of 3D printed parts.” *Rapid Prototyping Journal*, 2014. <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2013-0030>
11. URL: <https://lbi-corp.com/> (дата звернення: 01.05.2025).
12. URL: <https://monofilament.com.ua/ua/> (дата звернення: 01.05.2025).
13. URL: <https://shop.plexiwire.com.ua/> (дата звернення: 01.05.2025).
14. URL: <https://boze.com.ua/> (дата звернення: 01.05.2025).

Література

1. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Young%27s_modulus (дата звернення: 01.05.2025).
2. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Yield_\(engineering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Yield_(engineering)) (дата звернення: 01.05.2025).
3. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Deformation_\(engineering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Deformation_(engineering)) (дата звернення: 01.05.2025).
4. Tymrak B. M., Kreiger M., Pearce J. M. “Mechanical properties of components fabricated with open-source 3D printers under realistic environmental conditions.” *Materials & Design*, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038>
5. Torrado A. R., Roberson D. A., Wicker R. B. “Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by

material extrusion 3D printing.” *Additive Manufacturing*, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.02.001>

6. Kutsyk S., Mikulich O., Feshchuk Y. Experimental Study of Material Anisotropy Effect for 3D Printing Elements. *Materials Science Forum*, 1141, (2024) 63–72. <https://doi.org/10.4028/p-Xen66g>

7. Spoerk M., Holzer C., Gonzalez-Gutierrez J. “Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: A review on challenges, improvements, and applications.” *Polymers*, 2020. <https://doi.org/10.1002/app.48545>

8. Goh G. D. et al. “Process–structure–properties in polymer additive manufacturing via material extrusion: A review.” *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2020. <https://doi.org/10.1080/10408436.2018.1549977>

9. Ziemian C. W., Sharma M., Ziemian S. “Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling.” *Mechanical Engineering*, 2012. <https://doi.org/10.5772/34233>

10. Torrado Perez A. R. et al. “Impact of material and process parameters on the mechanical properties of 3D printed parts.” *Rapid Prototyping Journal*, 2014. <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2013-0030>

11. URL: <https://lbl-corp.com/> (дата звернення: 01.05.2025).

12. URL: <https://monofilament.com.ua/ua/> (дата звернення: 01.05.2025).

13. URL: <https://shop.plexiwire.com.ua/> (дата звернення: 01.05.2025).

14. URL: <https://boze.com.ua/> (дата звернення: 01.05.2025).

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 19.05.2025	Received 19.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 23.05.2025	Received in revised form 23.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

S. L. Kutsyk*

assistant, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5330-5911>

Department of Applied Mathematics and Mechanics

Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

O. A. Mikulich

D.Sc. in Engineering, Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-596X>

Department of Applied Mathematics and Mechanics

Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

D. A. Husachuk

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5899-1706>

Department of Materials Science

Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

*corresponding author, e-mail: sergiyk88@gmail.com

Influence of production specifications on the mechanical properties of 3D printed polymer elements

How to Cite:

Kutsyk S. L., Mikulich, O. A., Husachuk, D. A., (2025). Influence of production specifications on the mechanical properties of 3D printed polymer elements. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 132-142. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-13](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-13).

Abstract. This article presents the results of a study of the polymer filament manufacturer's influence on the mechanical characteristics of samples manufactured by the FDM (Fused Deposition Modeling) 3D printing method. The work aimed to determine the dependence of the strength properties of printed parts on the quality of raw materials from different filament manufacturers when using the same printing parameters. The experiment used four groups of samples of the same type and size, printed from filament from various manufacturers, on the same 3D printing installation with fixed technological parameters.

Mechanical tensile tests with longitudinal force were carried out on the universal testing machine MI-40KU with recording of the stress-strain state of the sample. To quantify the mechanical strength, the tensile elasticity and yield strength, Young's modulus, and elastic and plastic deformation in the yield zone were determined. The results obtained showed a significant variation in mechanical properties depending on the filament supplier, which is due to differences in polymer composition, degree of drying, impurities, and filament manufacturing technology.

The study demonstrates the critical importance of choosing high-quality material when designing and manufacturing critical parts using FDM printing. The data obtained can be used by 3D printing users, for whom it is important to choose not only the right type of filament, but also a manufacturer whose product will satisfy their needs in the manufacture of critical parts. The results demonstrate the importance of preliminary testing of materials before they are used in critical products. In addition, the load and strain graphs confirmed the analytical observations and provided a deeper understanding of the behavior of each type of sample under force loading.

Keywords: 3D printing, filament, manufacturing technology, strength characteristics.