

О. В. Тимошенко, доц., канд. техн. наук, **О. С. Мусієнко**, д-р філос., **Я. В. Демешко**
*Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна*
e-mail: timosaha@ukr.net, olga.musinko@gmail.com, demeshko.yaroslav.01@gmail.com

Технологічна пошкоджуваність конструкцій, виготовлених методом 3D-друку

У роботі досліджуються аспекти технологічної пошкоджуваності конструкцій, виготовлених за допомогою адитивних технологій, зокрема методом 3D-друку. Основною метою дослідження є аналіз впливу параметрів друку, зокрема ступеня заповнення, на механічні властивості матеріалу PLA, що є одним з найбільш популярних матеріалів для 3D-друку. У роботі детально розглянуто, як ступінь заповнення конструкцій, який варіюється від 20% до 100%, впливає на їх механічні характеристики, зокрема на межу міцності, модуль Юнга та деформацію при руйнуванні. Для дослідження було проведено експериментальні випробування на розтяг зразків PLA з різними відсотками заповнення. У результаті випробувань було виявлено, що з підвищенням ступеня заповнення конструкцій матеріал показує зростання жорсткості та міцності, однак на певних етапах цей ефект перестає бути лінійним. Найвищі значення механічних характеристик були зафіксовані при 100% заповненні, однак зменшення ступеня заповнення призводило до значного зниження міцності матеріалу, особливо при 20% заповненні, де було зафіксовано значну деформацію при менших навантаженнях. Це вказує на значний вплив внутрішньої структури матеріалу на його експлуатаційні характеристики, що повинно бути враховано при проєктуванні конструкцій для конкретних цілей.

PLA, 3D-друк, випробування на розтяг, міцність, модуль Юнга, початкова пошкоджуваність, параметр пошкоджуваності

Постановка проблеми. Сьогодні використання 3D-друку кардинально змінило напрям розвитку у багатьох галузях, зокрема машинобудуванні [1]. Його використовують для виготовлення деталей машин, протезів та несучих елементів конструкцій. Широкої популярності сприяла фундаментальна характеристика 3D-друку – виготовлення складних тривимірних об'єктів шляхом пошарового нанесення матеріалу, ця технологія суттєво скоротила час виготовлення деталей, зменшила витрату ресурсів та відкрила нові перспективи у машинобудуванні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найпоширенішою технологією 3D-друку є технологія моделювання плавненого осадження (FDM) [2 - 4]. Технологія полягає у екструзії, тобто пошарового нанесенні розплавленої нитки (філаменту) та її подальшому охолодженні, що і формує виріб шар за шаром.

Деталі виготовлені таким способом, через свою структуру, демонструють анізотропічні властивості [5, 6], що є актуальним питанням при визначенні міцності та несучої здатності елементів конструкції виготовлених методом FDM. Також міцність таких виробів залежить від вихідного матеріалу та схеми його укладання [7, 8], а також від параметрів друку. Для того щоб отримати виріб який буде повністю відповідати технічним вимогам, необхідно визначити найкращих параметри та налаштування для 3D – друку, такі натурні експерименти та чисельні моделювання проводяться різними групами дослідників [9, 10]. Однак, незважаючи на це, існує ще багато питань для подальших досліджень в цьому напрямку.

Поліактид (PLA) – термопласт, який виготовляється на основі молочної кислоти, отриманої з природних ресурсів. Він є одним із найпопулярніших матеріалів для 3D-Друку завдяки наступним перевагам: адаптивність, термопластичність, біосумісність та низька вартість [11].

Деформування конструкційних матеріалів, що відбувається за умов зовнішнього навантаження, супроводжується складними процесами зміни структури, зародженням, мікротріщин наступним руйнуванням елементу конструкції. Перша стадія руйнування (стадія розсіяного руйнування) складає 90 % життєвого циклу нової конструкції [12-15]. Вона описується, як правило, феноменологічними моделями у вигляді кінетичних рівнянь. В них пошкоджуваність матеріалу характеризується параметром пошкоджуваності, який може записати у вигляді скаляра, вектора або тензора [16-18]. Заклучна стадія руйнування (живучість) описана в літературі [19, 20] та моделях механіки руйнування [20-22].

Постановка завдання. Метою даного дослідження є визначення механічних характеристик та параметру технологічної пошкоджуваності PLA при врахуванні ступеня заповнення.

Виклад основного матеріалу. Для визначення механічних характеристик було вирішено проводити випробування на розтяг. Для проведення експерименту було виготовлено зразки, згідно стандарту ДСТУ EN ISO 527-2:2018 [23] (Рис. 1). Зразки були надруковані на 3D-принтері. Налаштування друку: кількість стінок – 2 шт, товщина верхньої і нижньої кришки – 1мм, рисунок верхньої і нижньої кришки – монотонний, рисунок заповнення – лінія, діаметр сопла – 0.2 мм. Було надруковано зразки з різним відсотком заповнення: 20%, 40%, 60%, 80% та 100%.

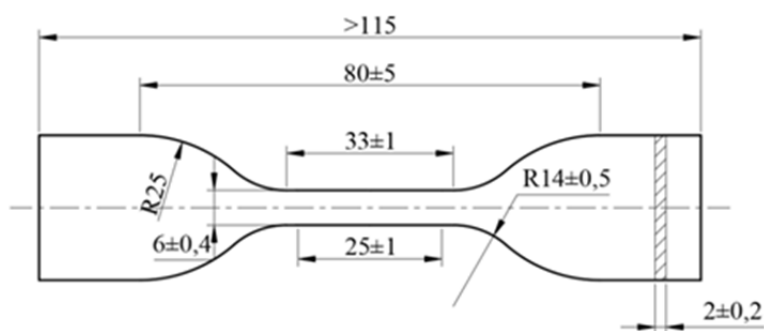


Рисунок 1 – Схема плоского зразка типу І відповідно до ДСТУ EN ISO 527-2:2018
Джерело: розроблено на підставі [23]

Після друку зразки було зважено, отримані дані занесено до таблиці 1.

Таблиця 1 – Вага зразка в залежності від ступеня заповнення

№ зразку	Заповнення, %	Вага, г	Густина
0	Філамент	0.6	1.2168
1	100	4.6	1.3945
2	80	4.3	1.3036
3	60	4.0	1.2126
4	40	3.7	1.1217
5	20	3.4	1.0308

Джерело: розроблено авторами

Експериментальні випробування проводились на універсальній розривній машині TIRAtest-2300. Сила вимірювалась за допомогою динамометра з ціною поділки 0,01 Н. Деформації вимірювались з робочої частини зразка за допомогою тензOMETра з ціною поділки 0,001 мм [24]. Зовнішній вигляд зразків показаний на рисунку 2.

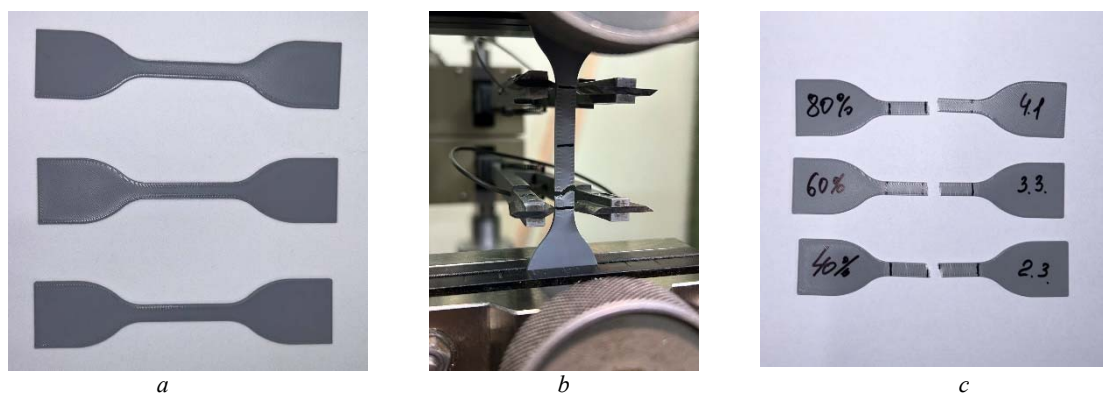


Рисунок 2 – Зразок після друку (а), у цангах (b) та після руйнування (с)

Джерело: розроблено авторами

Під час експерименту було випробувано 15 зразків. Для кожного відсотку заповнення було взято по 3 зразки. В результаті отримано діаграми розтягу для кожного ступеня заповнення зразку, що зображені на рисунку 3 [24].

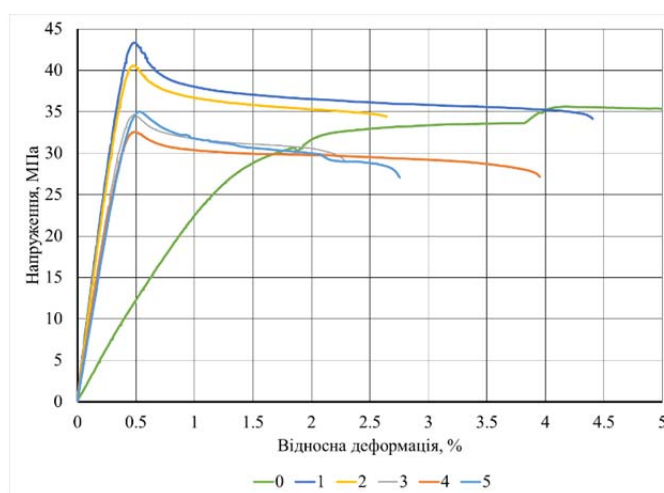


Рисунок 3 – Діаграми деформування: 0 – філамент, 1 – 100%, 2 – 80%, 3 – 60%, 4 – 40%, 5 – 20%

Джерело: розроблено авторами

Після обробки діаграм отримано значення границі міцності, відносної деформації та модуль Юнга для кожного ступеня заповнення. Отримані механічні характеристики наведено в таблиці 2.

Виходячи з отриманих результатів експериментальних досліджень, бачимо, що після термічного впливу спостерігається суттєве зменшення деформації з 23% до 4%, а модуль Юнга суттєво збільшується з 19 МПа до 112 МПа (рис. 4). Також з експериментальних даних видно вплив ступеня заповнення на поступове зменшення модуля Юнга, 112 МПа при 100% до 78 МПа при 20%, що показано на рис. 4.

Таблиця 2 – Механічні характеристики PLA

№ Зразку	Заповнення, %	Границя міцності, МПа	Відносна деформація при границі міцності, %	Модуль Юнга, МПа	Відносна деформація при руйнуванні
0	Філамент	40.79	3.13	19.19	22.88
1	100	43.47	0.59	112.19	3.01
2	80	39.72	0.49	104.52	3.81
3	60	34.59	0.47	89.90	3.03
4	40	32.56	0.47	85.69	3.21
5	20	34.65	0.47	78.12	3.91

Джерело: розроблено авторами

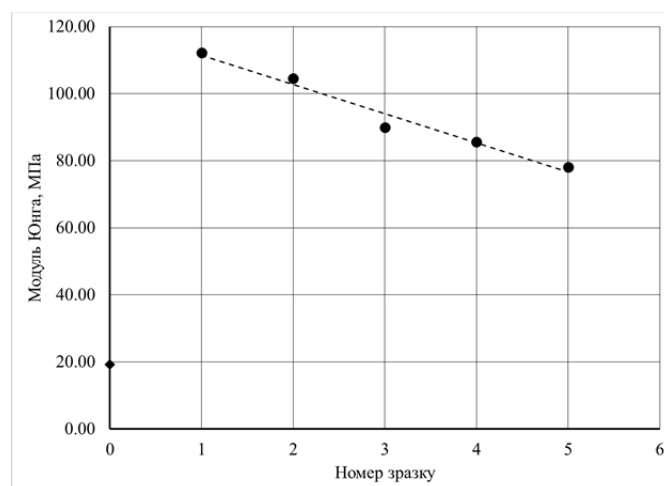


Рисунок 4 – Діаграма впливу ступеня заповнення на модуль Юнга

Джерело: розроблено авторами

Стадія розсіяного руйнування, що супроводжується деградацією модуля Юнга є основним показником впливу технологічної пошкоджуваності на міцність деталей та елементів конструкцій при різній ступені пошкодження [12-15]. За методом еквівалентних деформацій (МЕД) скалярний параметр пошкоджуваності D можна визначити згідно рівняння:

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \quad (1)$$

В свою чергу згідно методу еквівалентних енергій (МЕЕ), використовуючи основні положення термодинаміки незворотніх процесів, параметр прийме наступний вигляд:

$$D = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{E}}{E}} \quad (2)$$

Непошкодженим будемо вважати зразок з 100% заповнення. Тоді, згідно формул (1) та (2) розраховано параметр технологічної пошкоджуваності для PLA пластику. Результати розрахунку занесено до таблиці 3.

Таблиця 3 – Зміна параметрів пошкоджуваності від ступеня заповнення

№ зразку	Заповнення, %	D (МЕД)	D (МЕЕ)
1	100	0.000	0.000
2	80	0.068	0.035
3	60	0.199	0.105
4	40	0.236	0.126
5	20	0.304	0.166

Джерело: розроблено авторами

Виходячи з розрахунків, можна сказати, що параметр технологічної пошкоджуваності збільшується зі зменшенням ступеня заповнення (рисунок 5). Це свідчить про зменшення міцності та несучої здатності елемента конструкції, що буде виготовлений методом 3D-друку з PLA пластику.

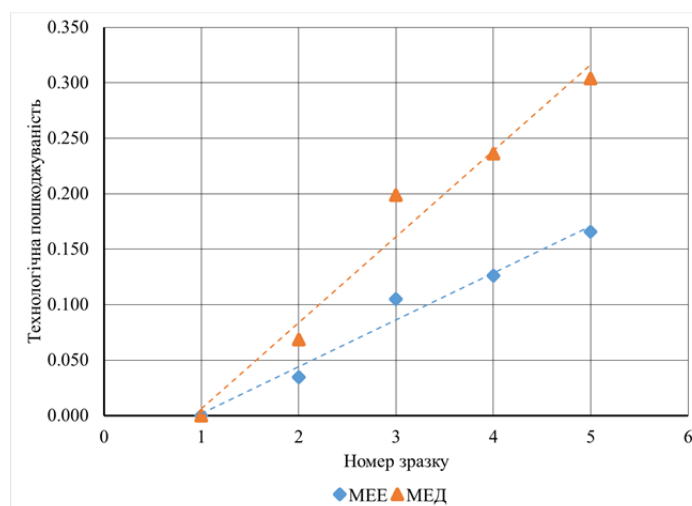


Рисунок 5 – Діаграма впливу ступеня заповнення на параметр технологічної пошкоджуваності
Джерело: розроблено авторами

Висновки.

1. За результатами проведених досліджень було виявлено, що параметри 3D-друку мають суттєвий вплив на механічні властивості виробів, виготовлених з PLA.

2. Виявлено, що ступінь заповнення конструкцій є одним з основних факторів, що визначає їх міцність. Встановлено, що при зміні заповнення від 100% до 20%, зміна границі міцності складає 21%, а модуля Юнга на 30%.

3. Урахування ступеня заповнення є важливим при проектуванні та виготовленні високонавантажених конструкцій за допомогою адитивних технологій. Визначення оптимальних параметрів друку на основі механічних властивостей матеріалу дозволить значно підвищити ефективність та надійність виробів, що відповідають сучасним вимогам в області адитивних технологій. Отримані результати дають змогу вибрати необхідний відсоток заповнення ще на етапі проектування, виходячи з технічних вимог до конструкції.

Список літератури

1. Srivastava, M., Rathee, S., Patel, V., Kumar, A., Koppad, P. G. A review of various materials for additive manufacturing: recent trends and processing issues. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 21. P. 2612–2641.
2. Залохін, М. Ю., Склярів, В. В., Довженко, Ю. С., Брега, Д. А. Експериментальне визначення та порівняльний аналіз міцнісних характеристик полімерів PPH030GP, ABS і PLA при різних швидкостях деформування. *Science & Technique*. 2019. №18. С. 233–239.
3. Stoia, D. I., Marsavina, L., Linul, E. Mode I critical energy release rate of additively manufactured polyamide samples. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2021. Vol. 114. Article 102968.
4. Singamneni, S., Behera, M. P., Truong, D., Le Guen, M. J., Macrae, E., Pickering, K. Direct extrusion 3D printing for a softer PLA-based bio-polymer composite in pellet form. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 15. P. 936–949.
5. Tao, Y., Kong, F., Li, Z., Zhang, J., Zhao, X., Yin, Q., Xing, D., Li, P. A review on voids of 3D printed parts by fused filament fabrication. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 15. P. 4860–4879.
6. Vidakis, N., Kechagias, J. D., Petousis, M., Vakouftsi, F., Mountakis, N. The effects of FFF 3D printing parameters on energy consumption. *Materials and Manufacturing Processes*. 2023. Vol. 38, No. 8. P. 915–932.
7. Cai, L., Byrd, P., Zhang, H., Schlarman, K., Zhang, Y., Golub, M., Zhang, J. Effect of printing orientation on strength of 3D printed ABS plastics. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 56. P. 453–460.
8. Мусієнко, О. С., Слободянюк, І. В., Ремінний, В. А. Вплив вологості полімерних матеріалів на механічні характеристики виробів, надрукованих методом 3D-друку. *Організаційно-економічні методи реалізації інноваційної моделі розвитку економіки*. 2024. С. 148.
9. Vălean, C., Marşavina, L., Mărghitaş, M., et al. The effect of crack insertion for FDM printed PLA materials on Mode I and Mode II fracture toughness. *Procedia Structural Integrity*. 2020. Vol. 28. P. 1134–1139.
10. Rubashevskiy, V., Shukayev, S. Міцність і пружність PLA+ графіт композитів: експериментальний і теоретичний аналіз // *Mechanics and Advanced Technologies*. 2023. Vol. 7, No. 2 (98). С. 145–154.

11. Hussain, M., Khan, S. M., Shafiq, M., Abbas, N. A review on PLA-based biodegradable materials for biomedical applications. *Journal of Polymer Research*. 2022. Vol. 29. Article 123.
12. Lemaitre, J., Desmorat, R. *Engineering Damage Mechanics*. Paris: Springer, 2005. 380 p.
13. Badreddine, H., Saanouni, K., Nguyen, T. D. Damage anisotropy and its effect on the plastic anisotropy evolution under finite strains. *International Journal of Solids and Structures*. 2015. Vol. 63. P. 11–31.
14. Lu, D., et al. Double scalar variables plastic-damage model for concrete. *Journal of Engineering Mechanics*. 2022. Vol. 148, No. 2. Article 04021143.
15. Xing, L., et al. A micromechanics-based damage constitutive model considering microstructure for aluminum alloys. *International Journal of Plasticity*. 2022. Vol. 157. Article 103390.
16. Chausov, M. G., Maruschak, P. O., Hutsaylyuk, V., Śniezek, L., Pylypenko, A. P. Effect of complex combined loading mode on the fracture toughness of titanium alloys. *Vacuum*. 2018. Vol. 147. P. 51–57.
17. Betten, J. Damage tensors in continuum mechanics. *Journal de Mécanique Théorique et Appliquée*. 1983. No. 1. P. 13–32.
18. Shedbale, A. S., Sun, G., Poh, L. H. A localizing gradient enhanced isotropic damage model with Ottosen equivalent strain for the mixed-mode fracture of concrete. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021. Vol. 199. Article 106410.
19. Brünig, M., Koirala, S., Gerke, S. Micro-mechanical numerical analysis on ductile damage in multiaxially loaded anisotropic metals. *Computational Mechanics*. 2024. Vol. 73, No. 2. P. 223–232.
20. Keshavarz, A., Ghajar, R. Effect of isotropic and anisotropic damage and plasticity on ductile crack initiation. *International Journal of Damage Mechanics*. 2019. Vol. 28, No. 6. P. 918–942.
21. Xing L., et al. A micromechanics-based damage constitutive model considering microstructure for aluminum alloys. *International Journal of Plasticity*. 2022. Vol. 157. P. 103390.
22. Yue, Z., et al. Failure prediction on steel sheet under different loading paths based on fully coupled ductile damage model. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019. Vol. 153. P. 1–9.
23. ДСТУ EN ISO 527-3:2017. Пластмаси. Визначення властивостей під час розтягування. Частина 3. Умови випробування для плівок і листів (EN ISO 527-3:1995; AC:2002, IDT; ISO 527-3:1995; Cor.1:2001, IDT).
24. Тимошенко, О. В., Мусяченко, О. С., Демешко, Я. В. Вплив структури заповнення на міцність PLA-пластику при 3D-друці. Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта. 2024. С. 60–62.

References

1. Srivastava, M., Rathee, S., Patel, V., Kumar, A., & Koppad, P. G. (2022). A review of various materials for additive manufacturing: Recent trends and processing issues. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 2612–2641. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.022>.
2. Zalohin, M. Yu., Skliarov, V. V., Dovzhenko, J. S., & Brega, D. A. (2019). Experimental determination and comparative analysis of the PPH030GP, ABS and PLA polymer strength characteristics at different strain rates. *Science & Technique*, 18, 233–239. DOI:10.21122/2227-1031-2019-18-3-233-239.
3. Stoia, D. I., Marsavina, L., & Linul, E. (2021). Mode I critical energy release rate of additively manufactured polyamide samples. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 114, 102968. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.102968> [in English].
4. Singamneni, S., Behera, M. P., Truong, D., Le Guen, M. J., Macrae, E., & Pickering, K. (2021). Direct extrusion 3D printing for a softer PLA-based bio-polymer composite in pellet form. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 936–949. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.041>.
5. Tao, Y., Kong, F., Li, Z., Zhang, J., Zhao, X., Yin, Q., Xing, D., & Li, P. (2021). A review on voids of 3D printed parts by fused filament fabrication. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 4860–4879. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.071>.
6. Vidakis, N., Kechagias, J. D., Petousis, M., Vakouftsi, F., & Mountakis, N. (2023). The effects of FFF 3D printing parameters on energy consumption. *Materials and Manufacturing Processes*, 38(8), 915–932. <https://doi.org/10.1080/10426914.2023.2191842>.
7. Cai, L., Byrd, P., Zhang, H., Schlarman, K., Zhang, Y., Golub, M., & Zhang, J. (n.d.). Effect of printing orientation on strength of 3D printed ABS plastics.
8. Musiienko, O. S., Slobodianiuk, I. V., & Reminny, V. A. (2024). The influence of moisture content of polymeric materials on the mechanical characteristics of products printed by 3D printing. *Sekcia 1 "Organisacyjno-ekonomichni Metodi realizacii inovacyjnoi modeli rozvutky ekonomiky"*, p.148 [in Ukrainian].
9. Vălean, C., Marşavina, L., Mărghitaş, M., & others. (2020). The effect of crack insertion for FDM printed PLA materials on Mode I and Mode II fracture toughness. *Procedia Structural Integrity*, 28, 1134–1139. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.10.134>.
10. Rubashevsky, V. V., & Shykaev, S. M. (2020). Micnist i pruzhnist PLA + graphit compositiv: experimentalny I teoretichnyy analiz. [Strength and elasticity of PLA + graphite composites: experimental and theoretical analysis.] p.145-154 [in Ukrainian].
11. Hussain, M., Khan, S. M., Shafiq, M., & Abbas, N. (n.d.). A review on PLA-based biodegradable materials for biomedical applications.
12. Lemaitre, J., & Desmorat, R. (2005). *Engineering Damage Mechanics*. Springer.

13. Badreddine, H., Saanouni, K., & Nguyen, T. D. (2015). Damage anisotropy and its effect on the plastic anisotropy evolution under finite strains. *International Journal of Solids and Structures*, 63, 11–31. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.02.009>.
14. Lu, D., et al. (2022). Double scalar variables plastic-damage model for concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, 148(2), 04021143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0002049](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0002049) [in English].
15. Xing, L., et al. (2022). A micromechanics-based damage constitutive model considering microstructure for aluminum alloys. *International Journal of Plasticity*, 157, 103390. doi.org/10.1016/j.ijplas.2022.103390.
16. Chausov, M. G., Maruschak, P. O., Hutsaylyuk, V., Śnieżek, L., & Pylypenko, A. P. (2018). Effect of complex combined loading mode on the fracture toughness of titanium alloys. *Vacuum*, 147, 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.10.010> [in English].
17. Betten, J. (1983). Damage tensors in continuum mechanics. *Journal de mécanique théorique appliquée*, 1, 13–32.
18. Shedbale, A. S., Sun, G., & Poh, L. H. (2021). A localizing gradient enhanced isotropic damage model with Ottosen equivalent strain for the mixed-mode fracture of concrete. *International Journal of Mechanical Sciences*, 199, 106410. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106410> [in English].
19. Brünig, M., Koirala, S., & Gerke, S. (2024). Micro-mechanical numerical analysis on ductile damage in multiaxially loaded anisotropic metals. *Computational Mechanics*, 73(2), 223–232. <https://doi.org/10.1007/s00466-023-02258-7>.
20. Keshavarz, A., & Ghajar, R. (2019). Effect of isotropic and anisotropic damage and plasticity on ductile crack initiation. *International Journal of Damage Mechanics*, 28(6), 918–942. <https://doi.org/10.1177/1056789519829691>.
21. Xing, L., et al. (2022). A micromechanics-based damage constitutive model considering microstructure for aluminum alloys. *International Journal of Plasticity*, 157, 103390. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2022.103390>.
22. Yue, Z., et al. (2019). Failure prediction on steel sheet under different loading paths based on fully coupled ductile damage model. *International Journal of Mechanical Sciences*, 153, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105349>.
23. DSTU EN ISO 527-3:2017. (2017). Plasmasy. Vysnachennya vlastivostey pid chas roztyguvannya. Chastyna 3. Umovy vyprobyvannya dlya plivok ta listiv. [Plastics. Determination of tensile properties. Part 3. Test conditions for films and sheets.] [in Ukrainian].
24. Tymoshenko, O. V., Musiienko, O. S., & Demeshko, Y. V. (2023). Vplyv struktury zapovnennya na micnist PLA-plastyku pry 3D-druci [Influence of the filling structure on the strength of PLA plastic in 3D printing.] p.60-62 [in Ukrainian].

Oleksandr Tymoshenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olha Musiienko**, PhD tech. sci., **Yaroslav Demeshko**
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

Technological Damage to Structures Made by 3D Printing

This paper investigates aspects of technological damage to structures made using additive technologies, in particular, 3D printing. The main objective of the study is to analyze the effect of printing parameters, in particular the degree of filling, on the mechanical properties of PLA material, which is one of the most popular materials for 3D printing. The paper discusses in detail how the degree of filling of structures, which varies from 20% to 100%, affects their mechanical characteristics, in particular, tensile strength, Young's modulus, and fracture strain.

To investigate this, experimental tensile tests were conducted on PLA samples with different percentages of filling. The tests revealed that with an increase in the degree of filling of the structures, the material shows an increase in stiffness and strength, but at certain stages this effect ceases to be linear. The highest values of mechanical characteristics were recorded at 100% filling, but a decrease in the degree of filling led to a significant decrease in the strength of the material, especially at 20% filling, where significant deformation was recorded at lower loads. This indicates a significant influence of the internal structure of the material on its performance, which should be taken into account when designing structures for specific purposes.

The obtained results allow us to draw important conclusions regarding the optimization of 3D printing parameters for the manufacture of PLA structures, taking into account the requirements for mechanical properties. Evaluation of the effect of the degree of filling on the parameters of technological damage to the material allows us to develop recommendations for selecting optimal printing conditions depending on the type of product and its intended operating conditions. As a result of the study, the correlation between the mechanical properties of the material and the parameters of 3D printing was determined, which is key to the development of efficient and reliable structures in various fields of application of additive technologies.

PLA, 3D printing, tensile testing, strength, Young's modulus, initial damage, damage parameter

Одержано (Received) 07.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 12.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 14.03.2025