

УДК 539.3

DOI: 10.20535/2409-7160.2023.XXIII.279320

**Аналіз пружних властивостей 3D-друкованих деталей методом скінченних елементів****В. В. Рубашевський, С. М. Шукаєв**

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

**Анотація.** Представлений порівняльний аналіз пружних властивостей 3D-друкованих деталей з полімерних композиційних матеріалів на основі РІ-пластику, визначених за методом скінченних елементів та експериментально. Досліджувались надруковані зразки з PLA-Cg+ та PLA-CCF із різними параметрами друку такими, як кут растру та товщина шару друку. Показано, що задіяний алгоритм чисельних розрахунків дає достатньо точу оцінку пружних характеристик матеріалів за різних комбінацій параметрів, що досліджувалися. Аналіз результатів засвідчив, що на точність розрахунків значний вплив має мікроструктура обумовлена розмірами і формою пор, які виникають під час друку.

**Ключові слова:** модуль Юнга; 3D-друк; метод скінченних елементів; PLA-Cg+; PLA CCF.

Технології 3D-друку широко використовуються у різноманітних галузях, таких як аерокосмічна, автомобільна, будівельна, медична та ін. Хоча 3D-друк був запроваджений для виробництва прототипів, наразі частіше ця технологія використовується для виготовлення готової продукції, що підвищує вимоги до властивостей друкованих виробів, зокрема до їх механічних характеристик.

Метою цього дослідження є вивчення впливу параметрів процесу 3D-друку за методом наплавлення, таких як орієнтація укладання та товщина шарів друку, на пружні характеристики зразків, виготовлених із композитних монониток на основі PLA пластику, а саме PLA-Cg+ (із наповненням шаруватого графіту 5%) та PLA-CCF (із введенням в PLA пластик 10% вуглецевих волокон).

Оскільки деталі при 3D-друці виготовляються з пошаровим додаванням плавненого полімеру, то їм властиві ортотропні характеристики. Отже, деталь набуває характеристик ортотропного матеріалу. У цій роботі, використовувалась система координат  $123$  показана на рис. 1, де  $1$  - напрямок растрової орієнтації,  $2$  - поперечний до растру напрямок і  $3$  - вертикальний напрямок.

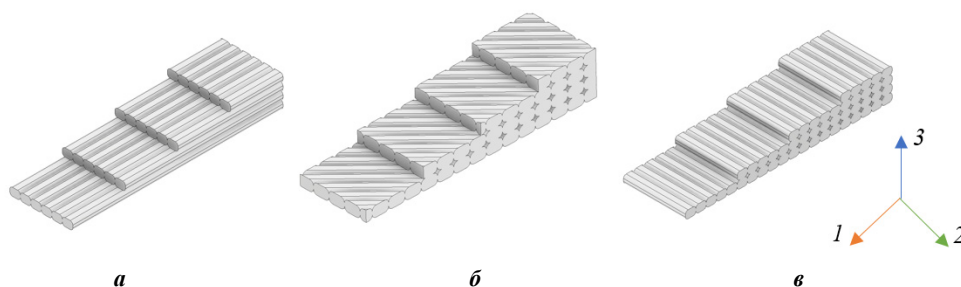


Рис. 1. Система координат  $123$ : а) кут друку  $0^\circ$ ; б)  $45^\circ$ ; в)  $90^\circ$

У таблиці 1 наведено параметри 3D-друку при виготовленні зразків типу 1 згідно ДСТУ EN ISO 527-2:2018.

Таблиця 1

Параметри 3Д-друку

Параметр	PLA-Cg+	PLA-CCF
Товщина друку	0,1 мм; 0,2 мм; 0,3 мм	0,1 мм; 0,2 мм; 0,3 мм
Діаметр сопла	0,4 мм	0,4 мм
Кут орієнтації друку	0°; 15°; 30°; 45°; 60°; 75°; 90°	0°; 15°; 30°; 45°; 60°; 75°; 90°
Температура друку	210°C	210°C
Температура платформи	60°C	60°C
Швидкість друку	55мм/с	55мм/с
Обдуб моделі	Присутній	Присутній

Для оцінки пружних властивостей використовувався узагальнений закон Гука. Відношення напруження до деформації в ортотропній моделі виражається як [1–3]:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\sigma}_{11} \\ \tilde{\sigma}_{22} \\ \tilde{\sigma}_{33} \\ \tilde{\sigma}_{12} \\ \tilde{\sigma}_{13} \\ \tilde{\sigma}_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{11} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ C_{11} & C_{11} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ C_{11} & C_{11} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\epsilon}_{11} \\ \tilde{\epsilon}_{22} \\ \tilde{\epsilon}_{33} \\ \tilde{\gamma}_{12} \\ \tilde{\gamma}_{13} \\ \tilde{\gamma}_{23} \end{bmatrix} \quad (1)$$

де  $\tilde{\sigma}_{ij}$  і  $\tilde{\epsilon}_{ij}, \tilde{\gamma}_{ij}$  є середніми тензорами напружень і деформацій обчисленими на основі мікромасштабної структури  $C_{ij}$  — елементи матриці жорсткості.

Мікромасштабна модель, що повторює поперечний переріз, була створена шляхом ідентифікації періодичних пустот вздовж границь шару та растру друку. Середня площа пустот була визначена на основі фрактографічного аналізу зразків (рис. 2).

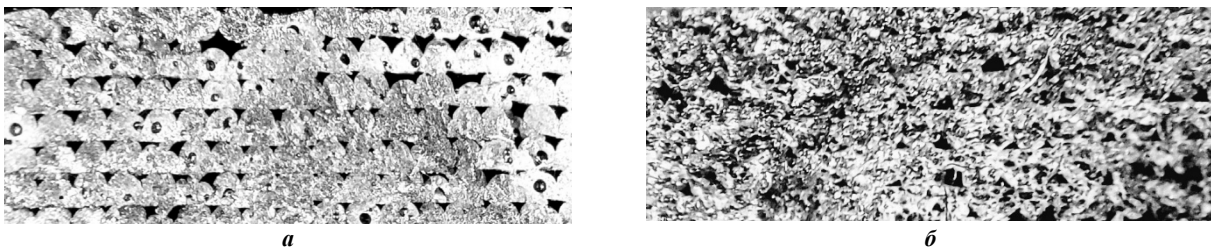


Рис. 2. Мікроструктура зразків товщиною 0,3 мм і кутом друку 0° виготовлених з: а) PLA-Cg+; б) PLA-CCF

На рис. 3 зображено мікроструктурні моделі побудовані на основі фрактографічного аналізу.

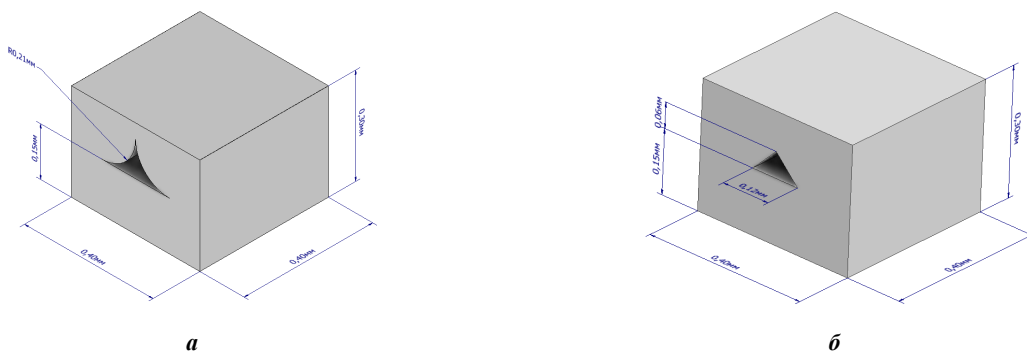


Рис. 3. Мікроструктурні моделі поперечного перерізу повторювальних елементів: а) PLA-Cg+; б) PLA-CCF



Властивості мікроструктур були визначені чисельним аналізом за допомогою програмного забезпечення MCE ANSYS Workbench. Моделям було задано властивості, отримані в результаті випробування на розтяг монониток PLA-Cg+ і PLA-CCF. Мононитки були експериментально дослідженні за умов розтягу. Властивості філаменту, отримані в результаті експериментальних досліджень, наведені в таблиці 2 і використані для чисельного аналізу.

Таблиця 2

Результати розтягу монониток

Механічна властивість	PLA-Cg+	PLA-CCF
Модуль Юнга, $E$ (МПа)	2380	2940
Границя текучості, $\sigma_y$ (МПа)	38	29
Деформація при границі текучості, $\epsilon_y$ (%)	1,84	1,98
Границя міцності, $\sigma_u$ (МПа)	51	42
Деформація руйнування, $\epsilon_{cr}$ (%)	9,34	2,61

Для розрахунків використовувався програмний комплекс ANSYS Workbench, в якому застосовуючи граничні умови та лінійні переміщення вздовж осі  $I$  було отримано осередненні напруження та визначено модуль Юнга. На рис. 4 показано розподіл переміщень для мікроструктурної моделі при товщині шару 0,3 мм і кутом друку  $0^\circ$ .

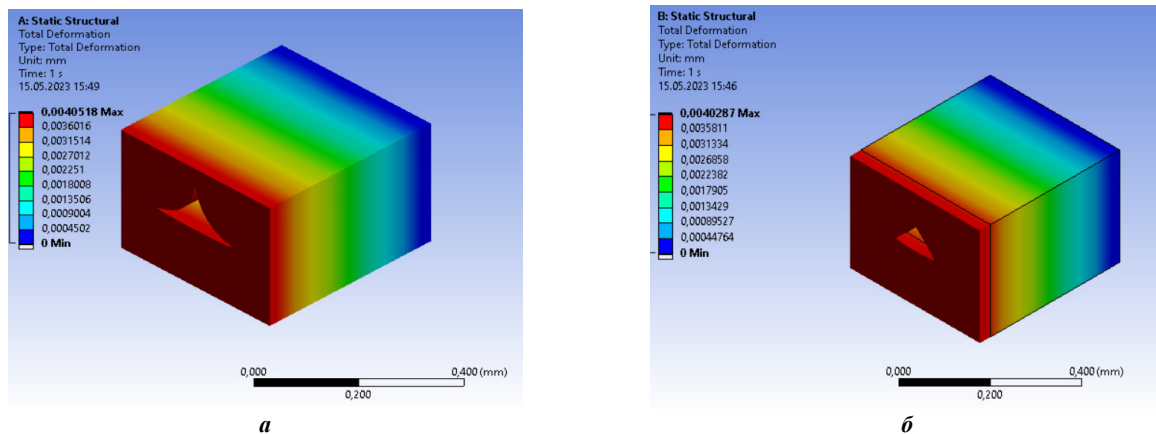


Рис. 4. Переміщення мікроструктурних моделей: а) PLA-Cg+; б) PLA-CCF

У таблицях 3 і 4 наведено результати порівняльного аналізу розрахункових і експериментальних даних. Експериментальні результати описані в роботі [4].

Таблиця 3

Результати для PLA-Cg+

Параметр	0,1 мм		0,2 мм		0,3 мм	
	Експер.	МСЕ	Експер.	МСЕ	Експер.	МСЕ
$E_0$	974,46	1036,83	1053,66	1164,29	1013,01	1109,25
$E_{15}$	931,95	991,59	1032,47	1140,88	979,36	1092,40
$E_{30}$	916,67	975,34	1087,06	1201,20	964,08	1085,67
$E_{45}$	973,52	1035,83	983,45	1086,71	1009,24	1075,12
$E_{60}$	934,92	994,75	1057,67	1168,73	933,34	1072,01
$E_{75}$	918,06	976,82	1007,28	1113,04	962,50	1053,94
$E_{90}$	979,04	1041,70	1060,64	1172,01	1016,39	1012,95

Таблиця 5

## Результати для PLA-CCF

Параметр	0,1 мм		0,2 мм		0,3 мм	
	Експер.	МСЕ	Експер.	МСЕ	Експер.	МСЕ
E <sub>0</sub>	2830,67	3042,97	1878,28	2028,54	1677,34	1789,72
E <sub>15</sub>	2540,13	2730,64	1796,74	1940,48	1612,41	1720,44
E <sub>30</sub>	2247,48	2416,04	1705,72	1842,18	1601,12	1708,40
E <sub>45</sub>	2028,18	2180,29	1616,14	1745,43	1596,76	1703,74
E <sub>60</sub>	1795,47	1930,13	1586,65	1713,58	1504,35	1605,14
E <sub>75</sub>	1638,54	1761,43	1514,47	1635,63	1434,20	1530,29
E <sub>90</sub>	1559,64	1676,61	1473,00	1590,84	1394,75	1488,20

**Висновки**

Результати досліджень засвідчили, що задіяний алгоритм чисельних розрахунків дає достатньо точу оцінку пружних характеристик полімерних композиційних матеріалів на основі PLA-пластика. Зокрема для PLA-Cg+ похибка оцінювання модуля пружності становила 6...12%, а для PLA-CCF – від 6% до 16%. Збільшення похибки оцінювання модуля пружності PLA-CCF пов'язано з більш складною мікроструктурою зразків. Тому подальше вдосконалення метода полягає в уточненні геометричної моделі пористості цього матеріалу.

**Список літератури**

1. Gonabadi, H., Chen, Y., Yadav, A. et al. Investigation of the effect of raster angle, build orientation, and infill density on the elastic response of 3D printed parts using finite element microstructural modeling and homogenization techniques. *Int J Adv Manuf Technol* 118, 1485–1510 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07940-4>.
2. Anoop, M.S., Senthil, P. Homogenisation of elastic properties in FDM components using microscale RVE numerical analysis. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 41, 540 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40430-019-2037-8>.
3. Рубашевський В.В., Шукаєв С.М. «Оцінювання граничного стану вуглепластику AS4/3501-6 carbon/epoxy зі схемою армування  $[90^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ]_s$  в умовах плоского та лінійного напруженого стану» *Mechanics and Advanced Technologies*, (2(86)), 7–13. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2019.86.176173>.
4. Rubashevskiy Viktor, Shukayev Sergiy. The effects of design parameters on the elastic properties of PLA-Graphite composites fabricated by 3D printing. *International Scientific and Technical conference "The Progressive Technics, Technology and Engineering Education"*. pp. 25-28. Kyiv-Kherson. Ukraine (2021).

**Analysis of elastic properties of 3D-printed parts using the finite element method**

V. Rubashevskiy, S. Shukayev

**Abstract.** This research paper presents a comparative analysis of the elastic properties of 3D-printed parts made from polymer composite materials using PLA plastic. The analysis was conducted using both the finite element method and experimental measurements. Specifically, PLA-Cg+ and PLA-CCF samples were printed with varying printing parameters, such as raster angle and print layer thickness. The study demonstrates that the employed numerical calculation algorithm provides sufficiently accurate assessment of the elastic characteristics of materials across different combinations of the investigated parameters. Moreover, the analysis of the results reveals that the accuracy of the calculations is significantly influenced by the microstructure, which is determined by the size and shape of the pores that form during the printing process.

**Keywords:** Young's modulus; 3D printing; finite element method; PLA-Cg+; PLA CCF