

УДК 620.1:621.9:616-77

**Грабар І. Г.**

доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри агроінженерії та технічного сервісу,  
Поліський національний університет  
Житомир, Україна  
**E-mail:** ivan-grabar@ukr.net  
**ORCID:** 0000-0002-7193-6960

**Кульман С. М.**

кандидат технічних наук,  
доцент кафедри агроінженерії та технічного сервісу,  
Поліський національний університет  
Житомир, Україна  
**E-mail:** mail@polissiauniver.edu.ua  
**ORCID:** 0009-0003-9717-6415

**Ксюковський О. В.**

аспірант кафедри агроінженерії та технічного сервісу,  
Поліський національний університет  
Житомир, Україна  
**E-mail:** x25x10x@gmail.com  
**ORCID:** 0009-0005-9183-0636

**Дубовик Д. А.**

аспірант кафедри агроінженерії та технічного сервісу,  
Поліський національний університет  
Житомир, Україна  
**E-mail:** dubovik26@ukr.net  
**ORCID:** 0009-0003-5233-9938

## КОНСТРУЮВАННЯ, 3D-ДРУК ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРКОЛЯЦІЙНО-ФРАКТАЛЬНИХ КОМПОЗИТНИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

### Анотація

У статті представлено результати досліджень фрактально-сотових композитних конструкційних елементів, виготовлених методом адитивного 3D-друку. Основна увага приділена вивченню впливу внутрішньої фрактальної структури та рівня заповнення на механічні характеристики зразків. Дослідження спрямовані на визначення залежності між параметрами внутрішнього заповнення ( $Q = 10\%, 30\%, 50\%, 100\%$ ) та такими показниками, як маса, густина, міцність і несуча здатність матеріалу.

Розроблено методику моделювання, проектування та розрахунку фрактальних структур з урахуванням вимог до експлуатаційної надійності, що дозволяє адаптувати конструкції до різних умов механічного навантаження. Створені цифрові моделі були використані для 3D-друку фізичних зразків із використанням композитного філамента на основі полімерної матриці. Проведено серію експериментальних випробувань на тиск, які показали закономірне зростання механічної ефективності зразків із підвищенням щільності внутрішнього заповнення.

Максимальні показники міцності досягаються при повному заповненні, тоді як при знижених рівнях ( $Q = 10\%$  і  $30\%$ ) спостерігається суттєве зниження несучої здатності та зменшення опору до деформацій. Отримані результати підтверджують, що відносна несуча здатність зразків зростає зі збільшенням об'ємної густини, що є критично важливим для прогнозованого використання конструкцій у відповідальних технічних системах.

Аналіз даних дозволив також виявити оптимальні співвідношення між показниками легкості, міцності та стабільності, що відкриває перспективи для подальшого вдосконалення конструктивних рішень. Зокрема, доцільним є застосування фрактально-сотових композитних матеріалів у медицині (ортопедичні імпланти, протези), у високотехнологічному машинобудуванні, в аерокосмічній та безпілотній авіації, де критично важливими є параметри масо-габаритної ефективності, а також у створенні енергоефективних, біосумісних та функціонально адаптивних інженерних систем нового покоління.

**Ключові слова:** 3D-друк (FDM), фрактально-сотові композити, щільність заповнення, механічні властивості.

**Вступ.** Сфери застосування фрактальних та перколяційно-фрактальних матеріалів протягом останніх 20–30 років стрімко розширюються. Це – розробка мультифрактальних матеріалів з нескінченно великою вільною поверхнею для задач хімічного та біохімічного синтезу; мультифрактальні фільтри; надлегкі мультифрактальні будівельні та тепло-, шумоізоляційні матеріали; мультифрактальні захисні екрани; мультифрактальні антени для прийому-передачі широкополосних сигналів тощо.

Серед пріоритетів застосування технологій 3D-друку композитних деталей слід вважати адаптивну ортопедію.

Сучасне протезування вимагає використання інноваційних технологій та композитних матеріалів, які забезпечують індивідуалізацію виробів, впливають на їх вагу і якість. Використання таких матеріалів та 3D-друку дозволяє застосувати гнучку та економічно вигідну методологію виробництва, що сприяє зменшенню часу виготовлення, зниженню витрат та підвищенню доступності.

Протези з цих матеріалів відповідають вимогам міцності, біосумісності, хімічної стійкості та зносостійкості.

Фрактальні композитні структури демонструють високі показники питомої несучої здатності та оптимальне співвідношення маси до жорсткості, що підтверджує їх перспективність для ортопедичних застосувань [2–5]. Фізико-механічні властивості таких матеріалів значною мірою визначаються їхньою мультифрактальною структурою, що забезпечує унікальні можливості для регулювання жорсткості та міцності [4]. Дослідження показали, що зміна рівня заповнення впливає на механічні властивості, дозволяючи адаптувати конструкцію до заданих умов експлуатації [10; 15; 16]. Такий підхід забезпечує рівномірний розподіл навантаження та підвищену ефективність при зменшенні матеріаломісткості [14; 18]. Враховуючи ці переваги, фрактальні композитні елементи мають значний потенціал для інновацій у біомедичних технологіях [12; 17].

Вважаємо за необхідне акцентувати увагу на великій кількості переваг даних матеріалів для задач ортопедії. Серед важливих чинників – можливість управління питомою вагою, жорсткістю, несучою здатністю при відносно невисоких показниках вартості. Реалізація технологій 3D-друку (FDM – Моделювання методом наплавлення) дозволяє впровадити дані ідеї в максимальній відповідності до конструкторського задуму.

**Метою даної роботи** є оцінка впливу рівня заповнення на комплекс механо-фізичних властивостей перколяційно-фрактальних композитних елементів, виготовлених методом 3D-друку.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Зразки виготовлялися методом 3D-друку. Дана технологія є найдоступнішою на даний час для виготовлення твердотільних фрактальних структур.

Виготовлялися циліндричні зразки розміри зразків 30x30 мм (DxH).

Зразок у поперечному перерізі мав форму тонкостінної труби з внутрішньою сотовою структурою заповнення. Торцеві частини виконані суцільними, що забезпечує підвищену жорсткість та стабільність конструкції (рис. 1).

Було використано технологію 3D-друку за допомогою програми PrusaSlicer, яка дозволяє точно налаштувати параметри друку для отримання потрібної якості та геометрії. Однією з ключових характеристик є щільність заповнення зразків. В ході досліджень використовувалися чотири варіанти заповнення: 10%, 30%, 50% та 100% (див. рис. 1). Таке варіювання дозволило оцінити вплив різного рівня внутрішньої пористості на механічні властивості композитних елементів. Товщина шару друку становила 0,22 мм, що забезпечило високий рівень деталізації поверхні.

Для експериментальних досліджень було виготовлено серію циліндричних зразків, які представляли собою тонкостінні труби з внутрішнім сотовим заповненням. Керована сотова структура дозволяє досягти максимальної жорсткості при мінімальній масі, що є критично важливим для ортопедичних виробів. Торцеві частини зразків виконані суцільними, що сприяє підвищенню стабільності та стійкості до механічних навантажень.



Рис. 1. Зразки композитних сотових конструкцій,  $\varnothing 30 \times H 40$

Програма друку була налаштована на створення двох проходів по контуру для кожного зразка, що сприяло підвищенню жорсткості та стабільності конструкції. Додатково, для покращення адгезії до платформи та підвищення міцності виробів, верхні та нижні шари зразків виконувалися суцільними (по два шари). В процесі друку використовувалася швидкість руху головки сопла 60 мм/с для периметрів та для внутрішнього заповнення, що сприяло формуванню рівномірної поверхні та збереженню геометричної точності зразків. Використання сопла діаметром 0,4 мм забезпечило високу деталізацію та точне відтворення дрібних елементів сотової структури, що дозволяло досягти балансу між якістю і швидкістю виготовлення зразків. Друк виконувався при температурі  $235\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  для філаменту PETG, що забезпечувало стабільні умови формування матеріалу. Для забезпечення якісної адгезії першого шару температура платформи підтримувалася на рівні  $80\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Контроль температурного режиму здійснювався програмно через налаштування параметрів друку в програмному забезпеченні 3D-принтера, що забезпечувало стабільність процесу формування першого шару та покращувало зчеплення матеріалу з поверхнею платформи.

Після виготовлення зразки випробовувались на стиск. Зразки після випробувань наведені на рисунку 2, наведено характерні види деформацій зразків.



Рис. 2. Зразки після випробувань на стиск

На рис. 3–6 наведено графіки залежності сили стискування від деформації зразків, отримані під час випробувань при  $Q = 100\%$ ,  $50\%$ ,  $30\%$  і  $10\%$ , що дозволяє оцінити поведінку матеріалу під навантаженням залежно від рівня заповнення.

У таблиці 1 наведено результати експериментальних вимірів маси, густини, максимальної напруги, границі текучості, модуля пружності та їх залежності від рівня заповнення  $Q$ .

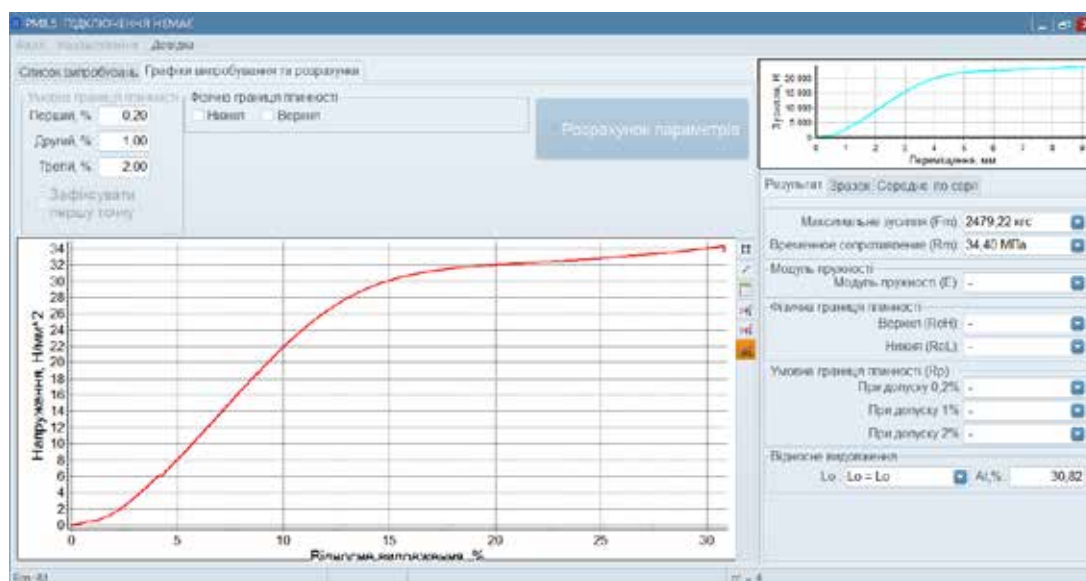


Рис. 3. Крива деформування зразка №1 ( $Q=100\%$ )



Рис. 4. Крива деформування зразка №2 (Q=50%)

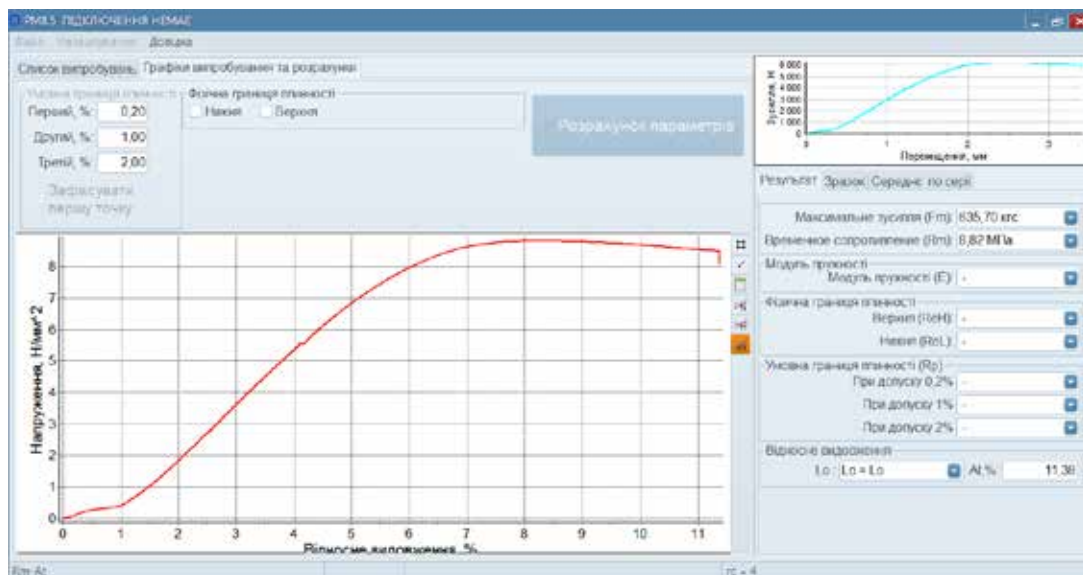


Рис. 5. Крива деформування зразка №3 (Q=30%)

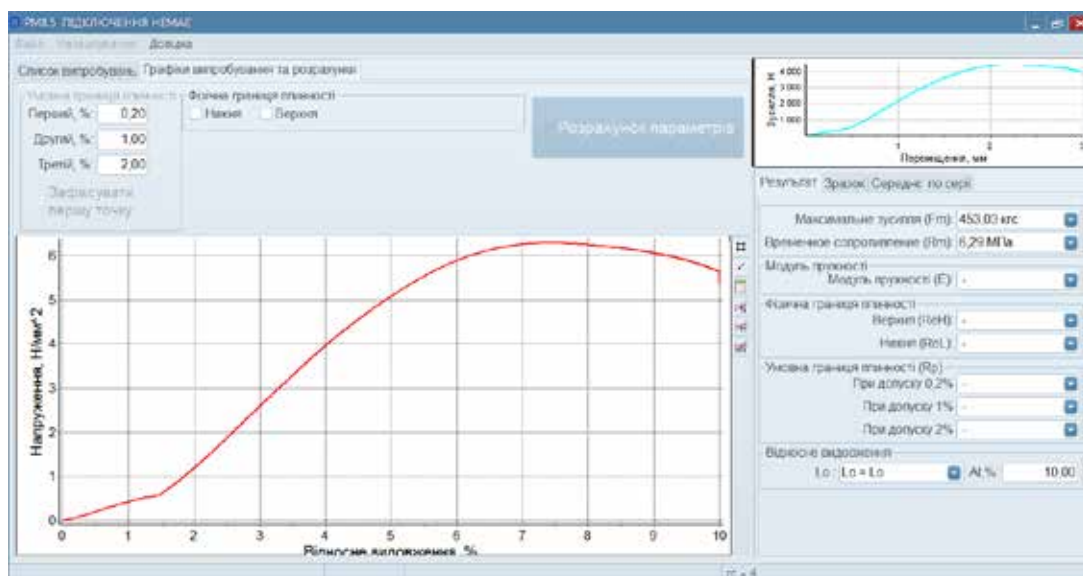


Рис. 6. Крива деформування зразка №4 (Q=10%)

**Таблиця 1. Маса, густина, максимальна напруга та інші механічні властивості зразків з різним рівнем заповнення**

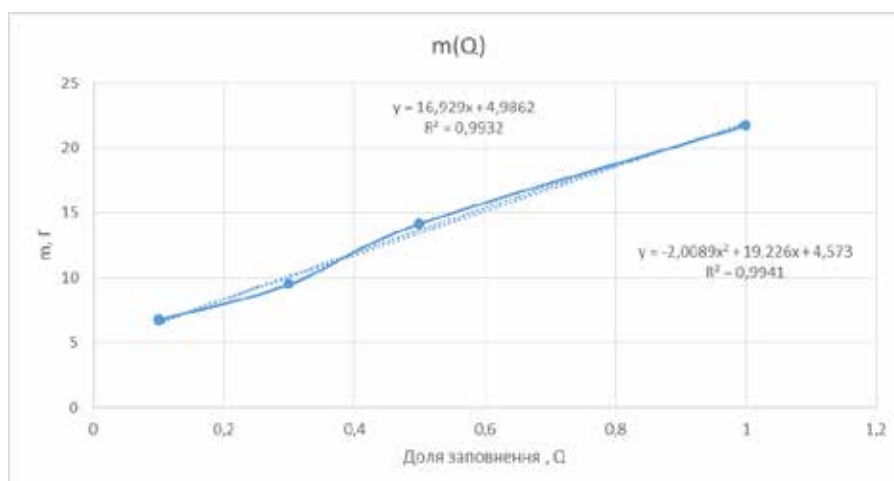
| № зразка | Заповнення Q | Маса зразка m, г | Густина $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $R_{max}$ , Н | $\sigma_b$ , МПа | $R_{пц}$ , кг | $\Delta l$ , мм | $P/\Delta l$ , кг/мм | $\sigma_t$ , МПа | E, МПа | $\sigma_{t/\rho}$ , МПа/г/см <sup>3</sup> |
|----------|--------------|------------------|------------------------------------|---------------|------------------|---------------|-----------------|----------------------|------------------|--------|-------------------------------------------|
| 1        | 100          | 21,73            | 1,025                              | 24790         | 34,4             | 1600          | 2,5             | 640                  | 22,6             | 272    | 22,1                                      |
| 2        | 50           | 14,16            | 0,688                              | 12530         | 17,4             | 900           | 1,68            | 536                  | 12,7             | 227    | 18,5                                      |
| 3        | 30           | 9,48             | 0,447                              | 6350          | 8,8              | 400           | 1,0             | 400                  | 5,7              | 172    | 12,7                                      |
| 4        | 10           | 6,74             | 0,318                              | 4530          | 6,3              | 300           | 0,93            | 323                  | 4,2              | 137    | 13,3                                      |

Вплив параметрів заповнення представлено в таблиці 2. Наведені результати демонструють зміну питомої несучої здатності зразків залежно від рівня заповнення та маси матеріалу.

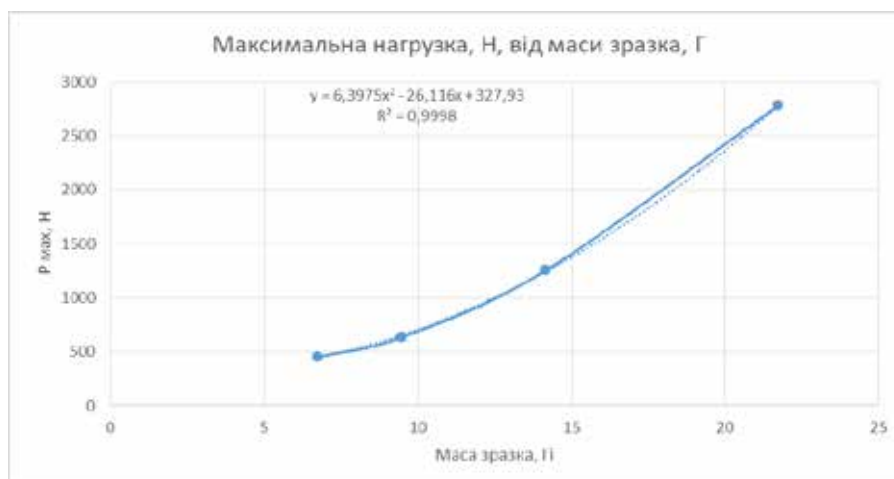
**Таблиця 2. Несуча здатність та питомі показники несучої здатності зразків з різним рівнем заповнення**

| № | Заповнення Q | Несуча здатність, $R_{max}/m$ , кг/г | $mQ/m100$ | $mQ/m30$ | Несуча здатність (Н/г) |
|---|--------------|--------------------------------------|-----------|----------|------------------------|
| 1 | 100          | 114,1                                | 1         | 2,29     | 1119,32                |
| 2 | 50           | 88,5                                 | 0,65      | 1,49     | 868,19                 |
| 3 | 30           | 68,4                                 | 0,44      | 1        | 671,00                 |
| 4 | 10           | 67,2                                 | 0,31      | 0,71     | 659,23                 |

За даними таблиць 1–2 побудовано залежність маси зразка від параметра заповнення. Як видно з рис. 7, ця залежність з високим коефіцієнтом кореляції описується лінійною функцією.

**Рис. 7. Залежність маси зразка від долі заповнення**

За даними таблиць 1–2 побудовано залежність максимальної навантаження від маси зразка. Як показано на рис. 8, ця залежність описується квадратичною функцією із високим коефіцієнтом кореляції.

**Рис. 8. Максимальна навантаження від маси зразка**

На рисунку 9 наведено залежність  $P_{\max}(Q)$ .

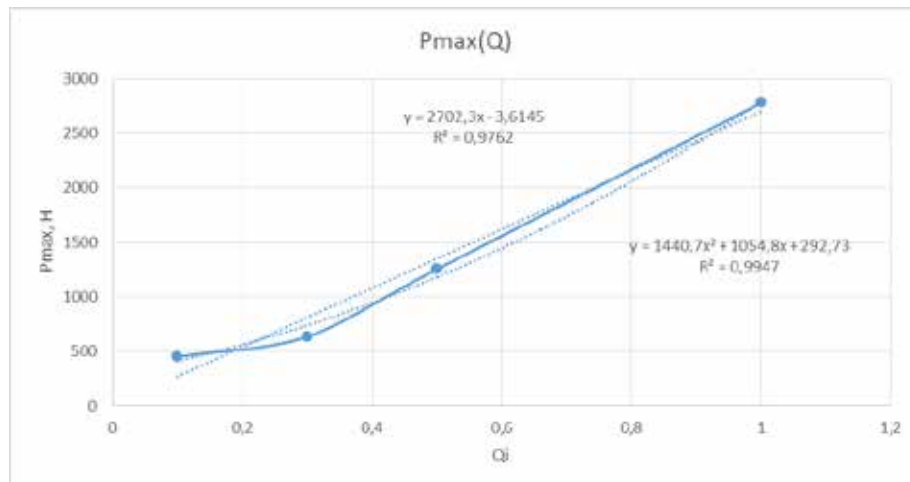


Рис. 9. Залежність максимального навантаження від долі заповнення

На рисунку 10 показано залежність напруг пропорційності від заповнення  $Q$ .

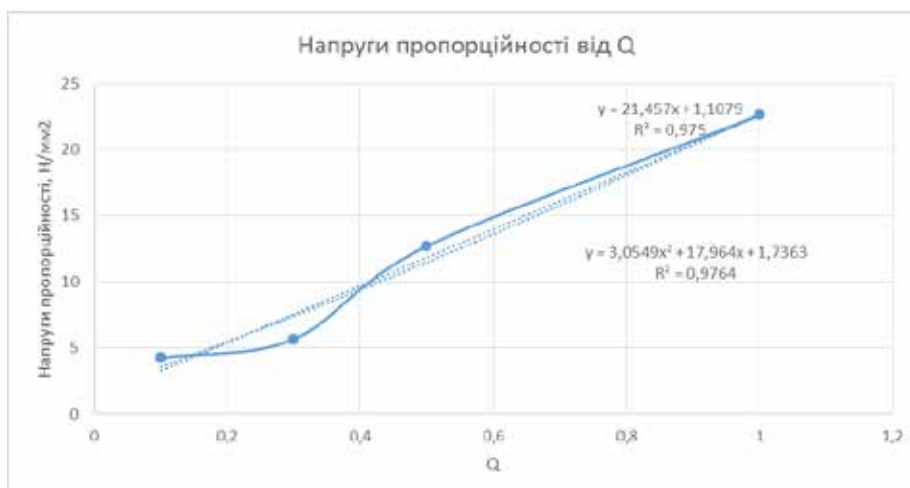


Рис. 10. Залежність напруг пропорційності від долі заповнення

На рисунках 11–13 наведено залежності модуля пружності, густини матеріалу та питомої несучої здатності зразків, які демонструють експоненційну, лінійну та поступову зміну відповідних характеристик залежно від рівня заповнення від  $Q$ .

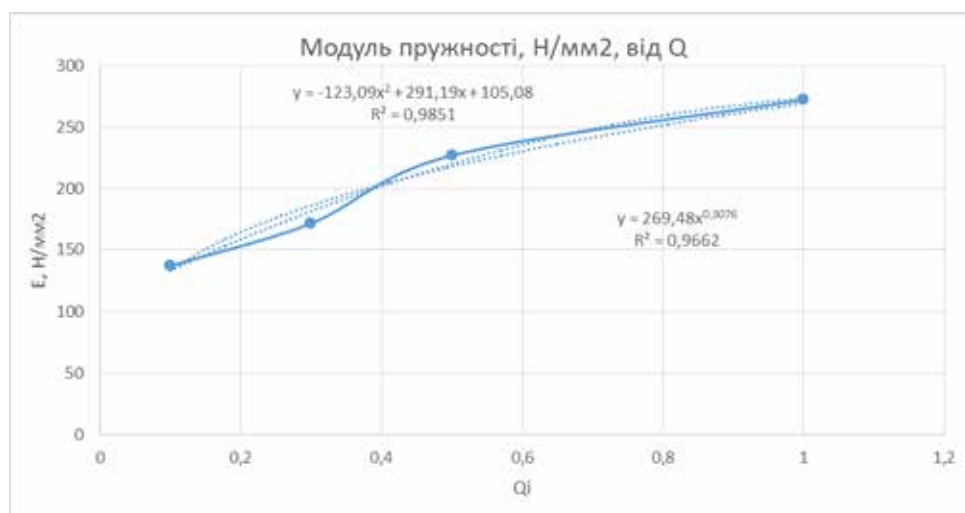


Рис. 11. Модуль пружності зразків залежно від долі заповнення

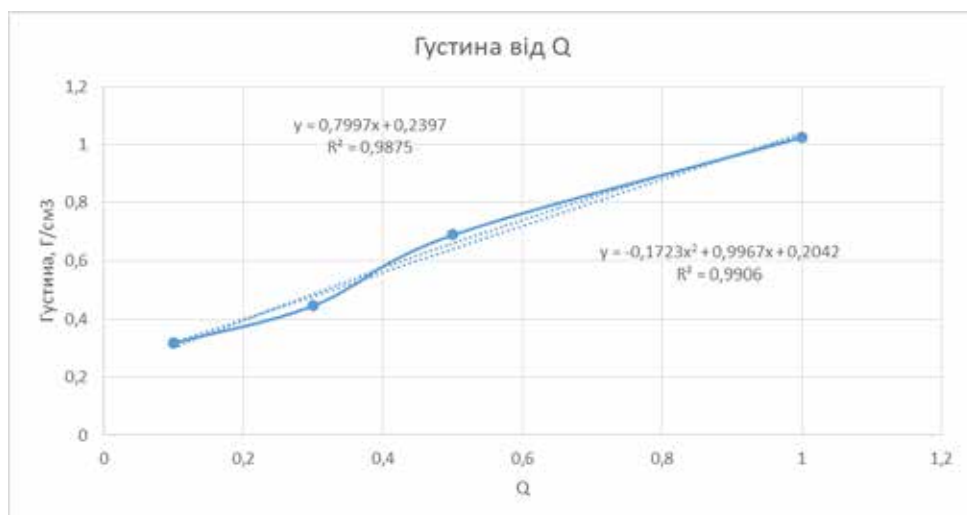


Рис. 12. Густина зразків залежно від долі заповнення

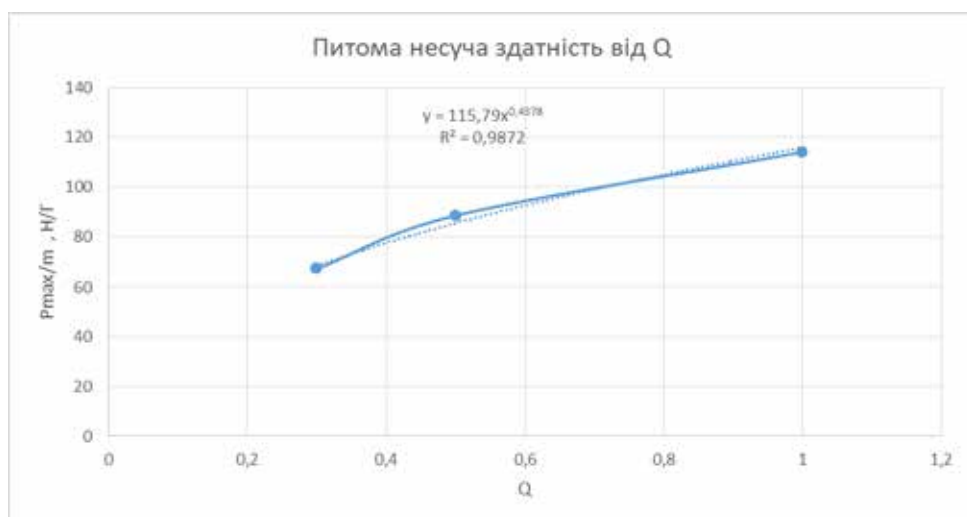


Рис. 13. Питома несуча здатність зразків залежно від долі заповнення

Відповідно до даних таблиць 1–2, на рисунку 14 представлено залежність максимальної навантаження від квадрату маси зразків, яка описується лінійною моделлю з високим коефіцієнтом кореляції 0,999.

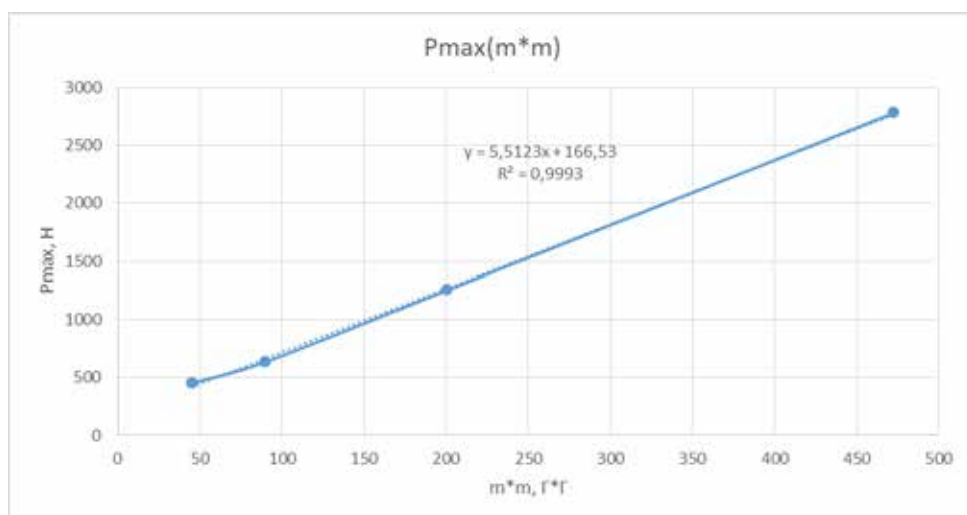


Рис. 14. Максимальна навантаження від квадрату маси зразка

**Висновки.** Проведене дослідження дозволяє зробити наступні висновки:

1. Розроблена методика 3D-друку сотових перколяційно-фрактальних композитів та отримані кількісні залежності їх параметрів від наповнення.
2. Методом 3D-друку виготовлені композитні дослідні зразки заданих параметрів  $Q = 10\%, 30\%, 50\%, 100\%$ . Проведені експериментальні дослідження зразків на стиск.
3. Обробка експериментальних даних виявила наступне:
  - відношення маси зразків з 100% заповненням до маси зразків ( $M_{\max}/M_{\min}$ ) при  $Q = 10\%$  склало 3,224,  $Q = 30\%$  склало 2,29,  $Q = 50\%$  склало 1,53;
  - при цьому питома вага зразків варіювалася від 0,318 г/см<sup>3</sup> ( $Q = 10\%$ ) до 1,025 г/см<sup>3</sup> ( $Q = 100\%$ );
  - відношення максимального та мінімального значень міцності на стиск становить  $\sigma_B^{\max}$  при  $Q = 100\% / \sigma_B^{\min}$  при  $Q = 10\% = 5,46$ ;
  - відношення границі текучості  $\sigma_T^{\max}$  при  $Q = 100\% / \sigma_T^{\min}$  при  $Q = 10\% = 5,38$ .
4. Відносна несуча здатність композитних зразків  $\eta = R^{\max}Q/mQ$  була найбільшою при  $Q = 100\%$  і становила 1119,32 Н/г. Для  $Q = 50\%$   $\eta$  склало 868,19 Н/г, (зменшення на 26,2%), при  $Q = 30\%$  – до 671,00 Н/г, (зменшення на 40,9%), а при  $Q = 10\%$  – до 659,23 Н/г (зменшення на 42%).

Подальші дослідження зосереджені на вивченні поведінки перколяційно-фрактальних структур під циклічними навантаженнями для оцінки їх довговічності та втомної міцності.

Отримані результати стануть підґрунтям для створення нового покоління адаптивних конструкцій для біомедичних і технічних застосувань.

#### Список використаних джерел

1. Гліненко Л. К., Сухонос О. Г. Основи моделювання технічних систем. Львів : Бескид Біт, 2003. 210 с.
2. Грабар І. Г. Перколяційно-фрактальні моделі в сучасному матеріалознавстві. *Наукові нотатки*. 2015. Вип. 49. С. 35–37.
3. Грабар І. Г. Прискорене прогнозування ресурсу конструкцій на стадії проектування та універсальна діаграма. *Вісник Національної академії наук України*. 2014. № 10. С. 22–27.
4. Грабар І. Г. Синтез мультифракталів. Житомир : Поліський національний університет, 2023. 94 с.
5. Грабар І. Г., Грабар О. І. Моделювання кінетики хаотизації аттрактора Фейгенбаума і динаміка нелінійних систем. *Фізико-математичний журнал*. 2012. Т. 14, № 3. С. 142–156.
6. Сергієнко В. В. Філософські проблеми наукового пізнання. Кременчук : Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2011. 96 с.
7. Соколовський В. С., Романова Н. О., Юшковська О. П. Лікувальна фізична культура. Одеса : Одеський державний медичний університет, 2005. 160 с.
8. Язловецький В. С. Основи діагностики функціонального стану та здоров'я : навч. посіб. для студ. ф-тів фіз. виховання вищих навч. закл. Кіровоград : РВВ КДПУ ім. В. Винниченка, 2003. 112 с.
9. Ячнюк І. О., Воробійов О. О., Романів Л. В., Ячнюк Ю. Б. Відновлювальні засоби працездатності у фізичній культурі і спорті. Чернівці : Книги XXI, 2009. 248 с.
10. Andrew J. J., Han K. A., Umer R., Schiffer A. Energy absorption and piezoresistive characteristics of 3D-printed hybrid honeycomb structures. *Advanced Materials Processing*. 2024. Vol. 12. P. 324–337. <https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2342430>
11. Dobrescu G., Papa F., State R. Fractal analysis and fractal dimension in materials chemistry. *Fractal and Fractional*. 2024. Vol. 8. P. 583–590. <https://doi.org/10.3390/fractalfract8100583>
12. Dong H., Wang S., Wang A., Lin C., et al. Low-frequency band gap and vibration suppression mechanism of a novel square hierarchical honeycomb metamaterial. *Applied Mechanics*. 2024. Vol. 41. P. 1841–1856. <https://doi.org/10.1007/s10483-024-3168-7>
13. Huang S., Zhang Y., Hou Z., Song Y., et al. HoneyComb: A flexible LLM-based agent system for materials science. *arXiv preprint*. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.00135>
14. Oftadeh R., Haghanipour B., Vella D., Boudaoud A., Vaziri A. Optimal fractal-like hierarchical honeycombs. *Physical Review Letters*. 2014. Vol. 113. P. 104301–104315. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.104301>
15. Roman G. E., Chezura F., Mariam R., Levchenko I., Oleksandr K., Riccardi C. Fractal geometry of polymer material surfaces: Surface area and roughness. *Soft Matter*. 2024. Vol. 20. P. 3082–3096. <https://doi.org/10.1039/D3SM01497E>
16. Song H., Hong S., Wang J., Zhu H., et al. Mechanical properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-dispersed nanomaterial honeycomb structures printed by 3D printer. *ACS Omega*. 2024. Vol. 9. P. 14287–14296. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c10138>
17. Yang L., He R., Wang C., Zhao H., et al. Analysis of chaotic characteristics in dynamic gravitational model with fractal structures. *Fractal and Fractional*. 2023. Vol. 7. P. 278–290. <https://doi.org/10.3390/fractalfract7030278>
18. Zhang C., Chen S., Dong T., Hao T., Wang J. Study of vibration characteristics of metamaterials with fractal honeycomb structures. *Vibration and Acoustics*. 2024. Vol. 35. P. 909–924. <https://doi.org/10.1007/s42417-023-00883-y>
19. Zhang Y., Yang S. H., Xin Y., Cai B., et al. Design of symmetric gradient honeycomb structures with high-efficiency micro-wave absorption. *Nano-Micro Letters*. 2024. Vol. 16. P. 234–245. <https://doi.org/10.1007/s40820-024-01435-z>

**Grabar I. G.**

*Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Head of the Department of Agroengineering and Technical Service,  
Polissya National University  
Zhytomyr, Ukraine  
E-mail: ivan-grabar@ukr.net  
ORCID: 0000-0002-7193-6960*

**Kulman S. M.**

*Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor at the Department of Agroengineering and Technical Service,  
Polissya National University  
Zhytomyr, Ukraine  
E-mail: mail@polissiauniver.edu.ua  
ORCID: 0009-0003-9717-6415*

**Ksiukovskyi O. V.**

*Postgraduate Student at the Department of Agroengineering and Technical Service,  
Polissya National University  
Zhytomyr, Ukraine  
E-mail: x25x10x@gmail.com  
ORCID: 0009-0005-9183-0636*

**Dubovik D. A.**

*Postgraduate Student at the Department of Agroengineering and Technical Service,  
Polissya National University  
Zhytomyr, Ukraine  
E-mail: dubovik26@ukr.net  
ORCID: 0009-0003-5233-9938*

## **DESIGN, 3D PRINTING AND EXPERIMENTAL STUDY OF PERCOLATION-FRACTAL COMPOSITE STRUCTURAL ELEMENTS**

### **Abstract**

*The paper presents the results of studies of fractal-honeycomb composite structural elements manufactured by additive 3D printing. The main attention is paid to the study of the influence of the internal fractal structure and the level of filling on the mechanical characteristics of the samples. The research is aimed at determining the relationship between the parameters of internal filling ( $Q = 10\%, 30\%, 50\%, 100\%$ ) and such indicators as mass, density, strength, and bearing capacity of the material.*

*A methodology has been developed for modeling, designing, and calculating fractal structures with regard to operational reliability requirements, which allows the structures to be adapted to different mechanical loading conditions. The created digital models were used for 3D printing of physical samples using a composite filament based on a polymer matrix. A series of experimental compression tests were conducted, which showed a natural increase in the mechanical efficiency of the samples with an increase in the density of the internal filling.*

*The maximum strength values are achieved at full filling, while at lower levels ( $Q = 10\%$  and  $30\%$ ) a significant decrease in bearing capacity and a decrease in resistance to deformation are observed. The results confirm that the relative bearing capacity of the samples increases with increasing bulk density, which is critical for the predicted use of structures in critical technical systems.*

*The data analysis also revealed the optimal correlations between the indicators of lightness, strength, and stability, which opens up prospects for further improvement of design solutions. In particular, it is advisable to use fractal-honeycomb composite materials in medicine (orthopedic implants, prostheses), in high-tech engineering, in aerospace and unmanned aerial vehicles, where the parameters of mass and dimensional efficiency are critically important, as well as in the creation of energy-efficient, biocompatible and functionally adaptive engineering systems of a new generation.*

**Key words:** 3D printing (FDM), fractal honeycomb composites, filling density, mechanical properties.

### **References**

1. Hlinenko, L.K., & Sukhonosov, O.H. (2003). Osnovy modeliuвання tekhnichnykh system [Fundamentals of modeling of technical systems]. Beskyd Bit. [in Ukrainian].
2. Grabar, I.G. (2014). Pryskorene prohnouzuvannya resursu konstruksii na stadii proektuvannya ta universalna diagrama [Accelerated prediction of the structural resource at the design stage and universal diagram]. *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, (10), 22–27. [in Ukrainian].
3. Grabar, I.G. (2015). Perkoliatsiino-fraktalni modeli v suchasnomu materialoznavstvi [Percolation-fractal models in modern materials science]. *Naukovi notatky*, (49), 35–37. [in Ukrainian].

4. Grabar, I.G. (2023). *Synthes multyfraktaliv [Synthesis of multifractals]*. Polissia National University. [in Ukrainian].
5. Grabar, I.G., & Grabar, O.I. (2012). Modeliuvannya kinetyky khaotyzatsii atrakora Feigenbauma i dynamika nelineinykh system [Modeling the kinetics of Feigenbaum attractor chaotization and dynamics of nonlinear systems]. *Fizyko-matematychnyi zhurnal*, 14(3), 142–156. [in Ukrainian].
6. Serhiienko, V.V. (2011). *Filosofski problemy naukovoho piznannia [Philosophical problems of scientific knowledge]*. Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. [in Ukrainian].
7. Sokolovskyi, V.S., Romanova, N.O., & Yushkovska, O. P. (2005). *Likuvalna fizychna kultura [Therapeutic physical culture]*. Odesa State Medical University. [in Ukrainian].
8. Yazlovetskyi, V.S. (2003). *Osnovy diahnostryky funktsionalnoho stanu ta zdorovia [Fundamentals of diagnosing functional state and health]*. RVV KDPU im. V. Vynnychenka. [in Ukrainian].
9. Yachniuk, I.O., Vorobiov, O.O., Romaniv, L.V., & Yachniuk, Yu. B. (2009). *Vidnovliuvalni zasoby pratsiezdatsnosti u fizychnii kulturi i sporti [Restorative means of work capacity in physical culture and sports]*. Knyhy XXI. [in Ukrainian].
10. Andrew, J.J., Han, K.A., Umer, R., & Schiffer, A. (2024). Energy absorption and piezoresistive characteristics of 3D-printed hybrid honeycomb structures. *Advanced Materials Processing*, 12, 324–337. <https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2342430> [in English].
11. Dobrescu, G., Papa, F., & State, R. (2024). Fractal analysis and fractal dimension in materials chemistry. *Fractal and Fractional*, 8, 583–590. <https://doi.org/10.3390/fractalfract8100583> [in English].
12. Dong, H., Wang, S., Wang, A., & Lin, C., et al. (2024). Low-frequency band gap and vibration suppression mechanism of a novel square hierarchical honeycomb metamaterial. *Applied Mechanics*, 41, 1841–1856. <https://doi.org/10.1007/s10483-024-3168-7> [in English].
13. Huang, S., Zhang, Y., Hou, Z., & Song, Y., et al. (2024). HoneyComb: A flexible LLM-based agent system for materials science. arXiv Preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.00135> [in English].
14. Oftadeh, R., Haghani-pour, B., Vella, D., Boudaoud, A., & Vaziri, A. (2014). Optimal fractal-like hierarchical honeycombs. *Physical Review Letters*, 113, 104301–104315. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.104301> [in English].
15. Roman, G. E., Chezura, F., Mariam, R., Levchenko, I., Oleksandr, K., & Riccardi, C. (2024). Fractal geometry of polymer material surfaces: Surface area and roughness. *Soft Matter*, 20, 3082–3096. <https://doi.org/10.1039/D3SM01497E> [in English].
16. Song, H., Hong, S., Wang, J., & Zhu, H., et al. (2024). Mechanical properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-dispersed nanomaterial honeycomb structures printed by 3D printer. *ACS Omega*, 9, 14287–14296. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c10138> [in English].
17. Yang, L., He, R., Wang, C., Zhao, H., et al. (2023). Analysis of chaotic characteristics in dynamic gravitational model with fractal structures. *Fractal and Fractional*, 7, 278–290. <https://doi.org/10.3390/fractalfract7030278> [in English].
18. Zhang, C., Chen, S., Dong, T., Hao, T., & Wang, J. (2024). Study of vibration characteristics of metamaterials with fractal honeycomb structures. *Vibration and Acoustics*, 35, 909–924. <https://doi.org/10.1007/s42417-023-00883-y> [in English].
19. Zhang, Y., Yang, S. H., Xin, Y., Cai, B., et al. (2024). Design of symmetric gradient honeycomb structures with high-efficiency microwave absorption. *Nano-Micro Letters*, 16, 234–245. <https://doi.org/10.1007/s40820-024-01435-z> [in English].