

Грабар І. Г., д.т.н., професор, Кульман С. М., к.т.н., доцент, Ксюковський О. В., аспірант, Дубовик Д. А., аспірант (Поліський національний університет, м. Житомир)

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

У статті представлено результати досліджень фрактально-стільникових композитних конструкційних елементів, виготовлених методом 3D-друку. Дослідження спрямовані на оцінку механічних характеристик матеріалу залежно від рівня заповнення внутрішньої структури ($Q = 10\%, 30\%, 50\%, 100\%$). Розроблено методику розрахунку та виготовлення зразків, що дає змогу адаптувати їхні механічні властивості відповідно до заданих експлуатаційних умов. Проведено серію експериментальних випробувань на стиск, які продемонстрували значні зміни маси, густини, міцності та несучої здатності зразків у залежності від рівня заповнення. Результати випробувань показали, що відносна несуча здатність зразків зростає зі збільшенням щільності заповнення, досягаючи максимального значення при $Q = 100\%$, тоді як при нижчих рівнях заповнення спостерігається суттєве зниження характеристик міцності. Аналіз отриманих даних підтверджує доцільність використання композитних матеріалів із фрактальною структурою для створення адаптивних елементів у різних сферах техніки та медицини. Зокрема, перспективним напрямком є їхнє застосування у виробництві ортопедичних імплантатів і протезів, дронів, БПЛА літакового та коптерного типу. Це відкриває нові можливості для розробки легких, міцних і біосумісних конструкцій, що поєднують високі механічні характеристики з оптимізованою аеродинамікою.

Ключові слова: 3D-друк (FDM); фрактально-стільникові 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 [2–4]. Фізико-механічні властивості таких матеріалів значною мірою визначаються їхньою мультифрактальною структурою, що забезпечує унікальні можливості для регулювання жорсткості та міцності [1]. Дослідження показали, що зміна рівня заповнення впливає на механічні властивості, дозволяючи адаптувати конструкцію до заданих умов експлуатації [6; 8; 12]. Такий підхід забезпечує рівномірний розподіл навантаження та підвищену ефективність при зменшенні матеріаломісткості [9; 14]. Враховуючи ці переваги, фрактальні композитні елементи мають значний потенціал для інновацій у біомедичних технологіях [10; 13].

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 максимально впровадити ці ідеї відповідно до конструкторського задуму.

Методика експерименту

Зразки виготовлялися методом 3D-друку. Ця технологія є найдоступнішою на сьогодні для виготовлення твердотільних фрактальних структур.

Виготовлялися циліндричні зразки розміром 30x30 мм (DxH).

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

Було використано технологію 3D-друку з 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% (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.

Результати 3D-друку зразків

Для експериментальних досліджень було виготовлено серію циліндричних зразків, які представляли собою тонкостінні труби з внутрішнім стільниковим заповненням. Керована стільникова 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.

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 стільникової структури, що дозволяло досягти балансу між якістю і швидкістю виготовлення зразків. Друк виконувався при температурі $235^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ для філаменту PETG, що забезпечувало стабільні умови формування матеріалу. Для забезпечення якісної адгезії першого шару температура платформи підтримувалася на рівні $80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. 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 рис. 1.

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 .

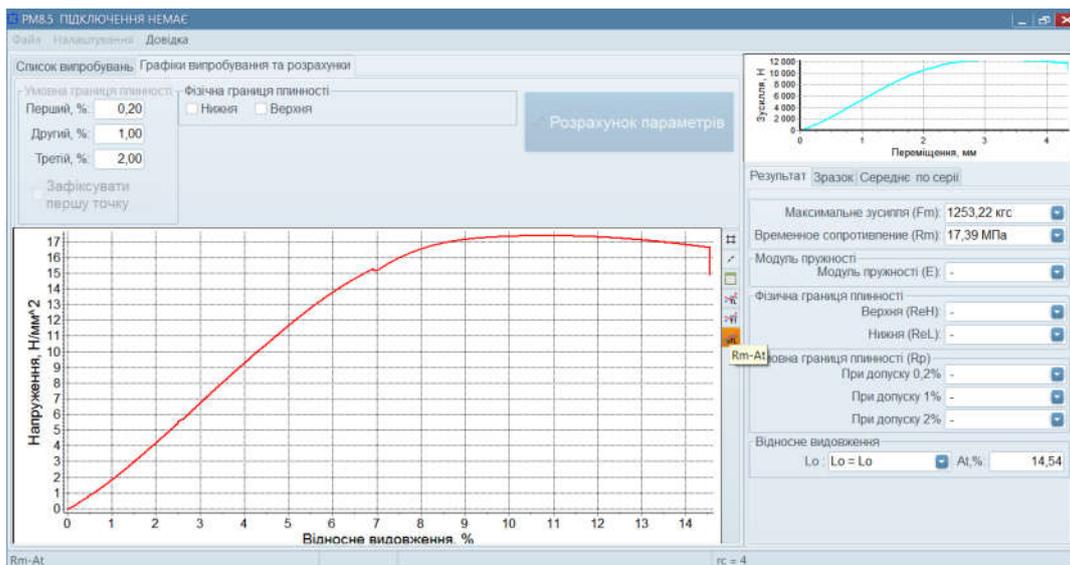
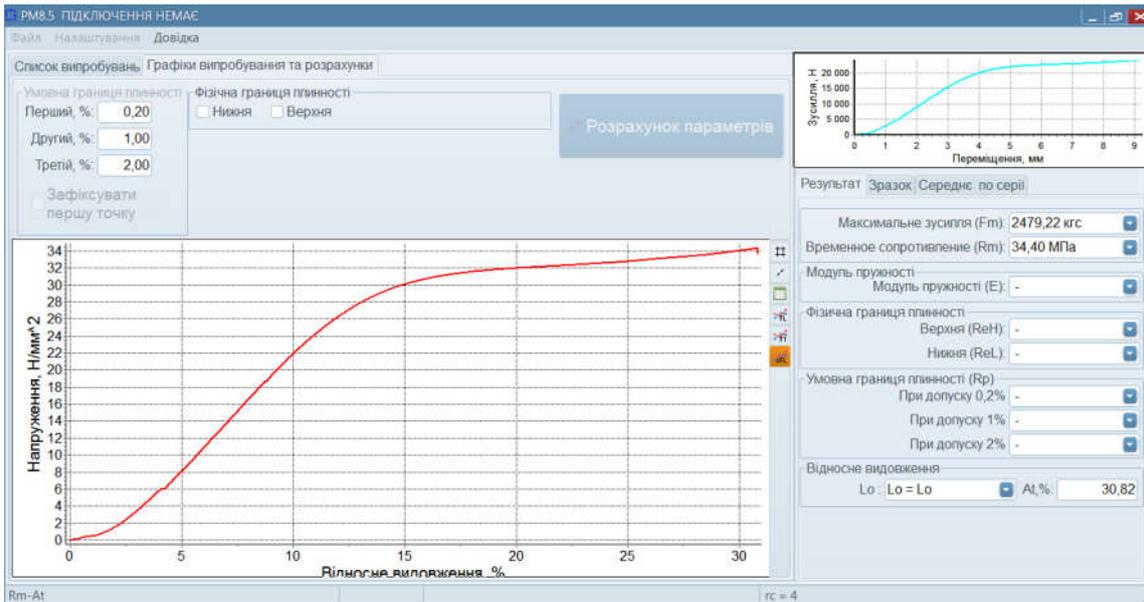


Рис. 1. Зразки композитних стільникових конструкцій, $\varnothing 30 \times H 40$

На рис. 2 наведено характерні види деформацій зразків.



Рис. 2. Зразки після випробувань на стиск



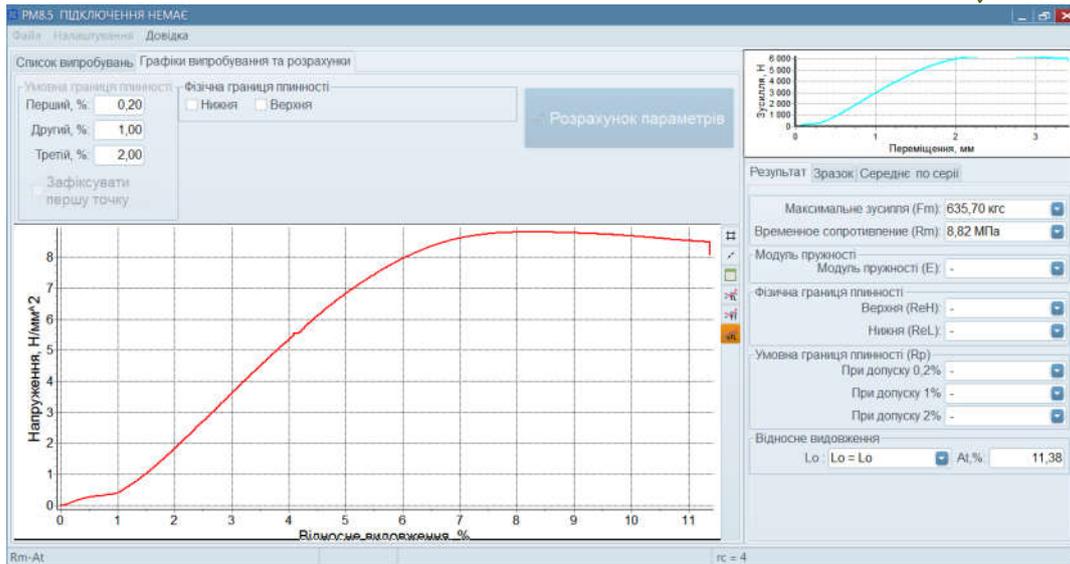


Рис. 5. Крива деформування зразка № 3 (Q=30%)

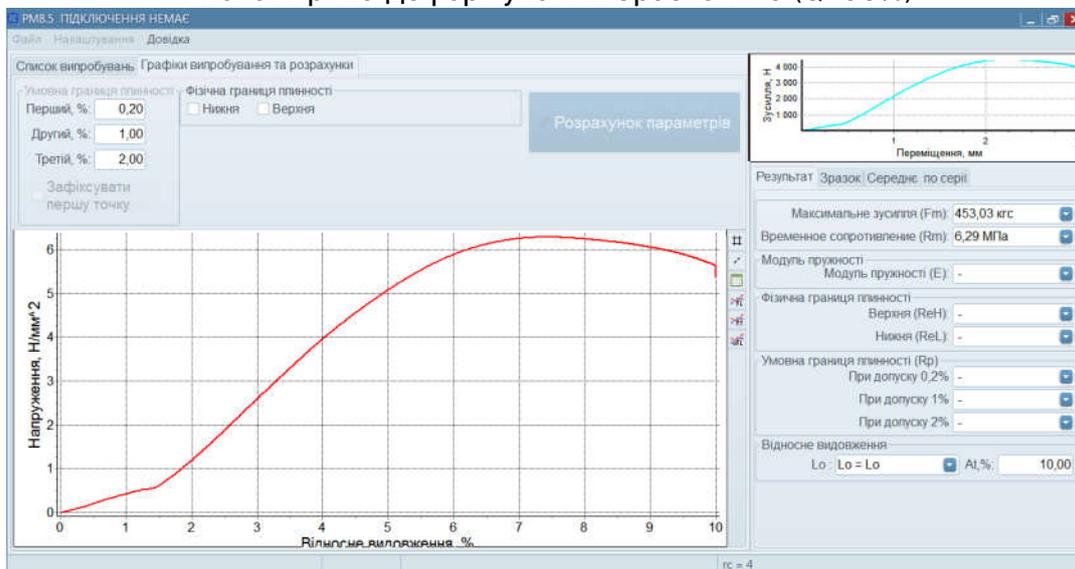


Рис. 6. Крива деформування зразка №4 (Q=10%)

Таблиця 1

Маса, густина, максимальна напруга та інші механічні властивості зразків з різним рівнем заповнення

№ зразка	Заповнення Q	Маса зразка m, г	Густина ρ , г/см ³	R_{max} , Н	σ_b , МПа	$R_{пц}$, кг	Δl , мм	$P / \Delta l$, кг/мм	σ_t , МПа	E, МПа	σ_t / ρ МПа/г/см ³
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.

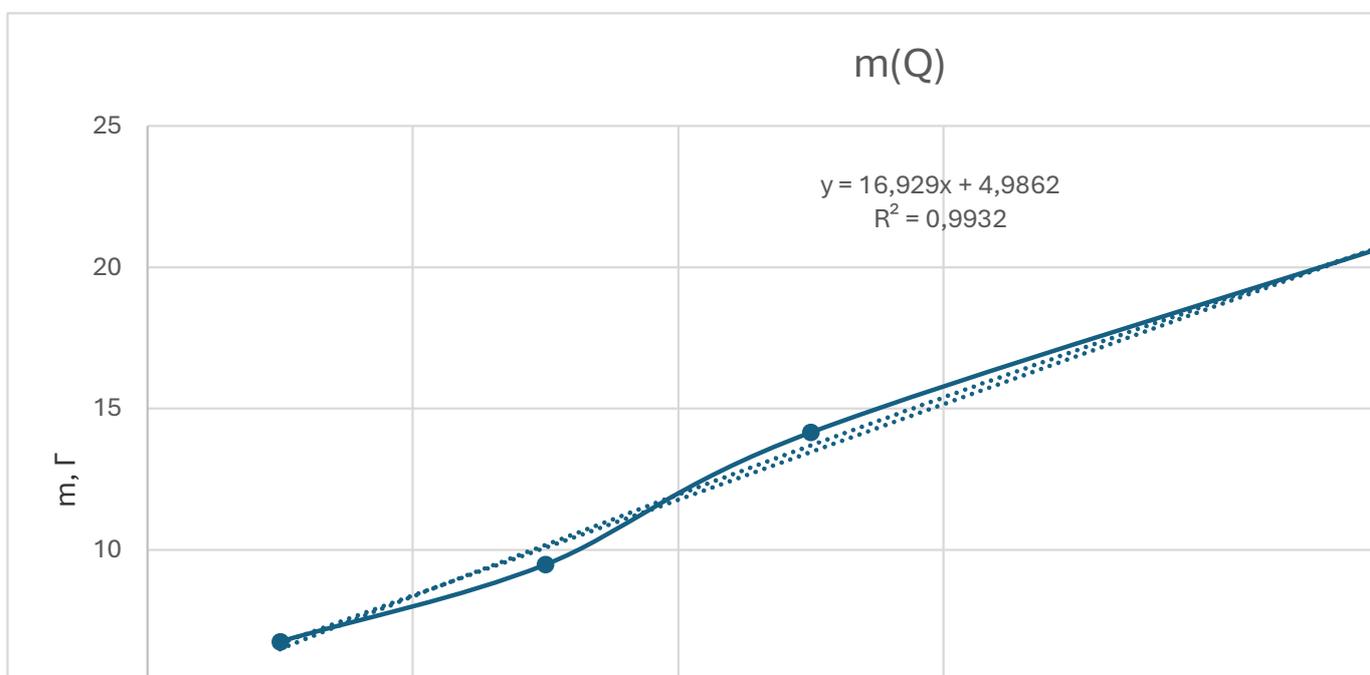
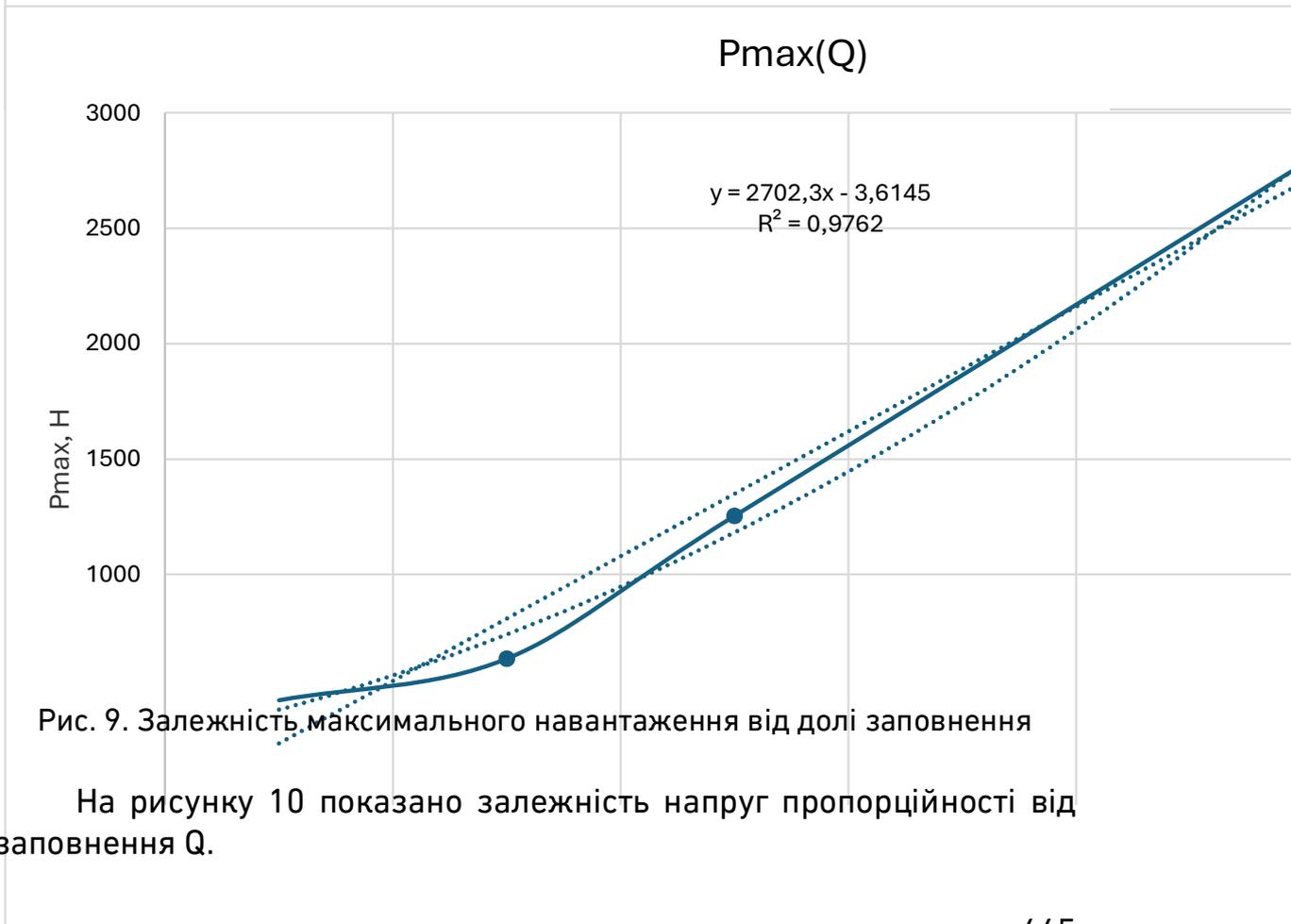
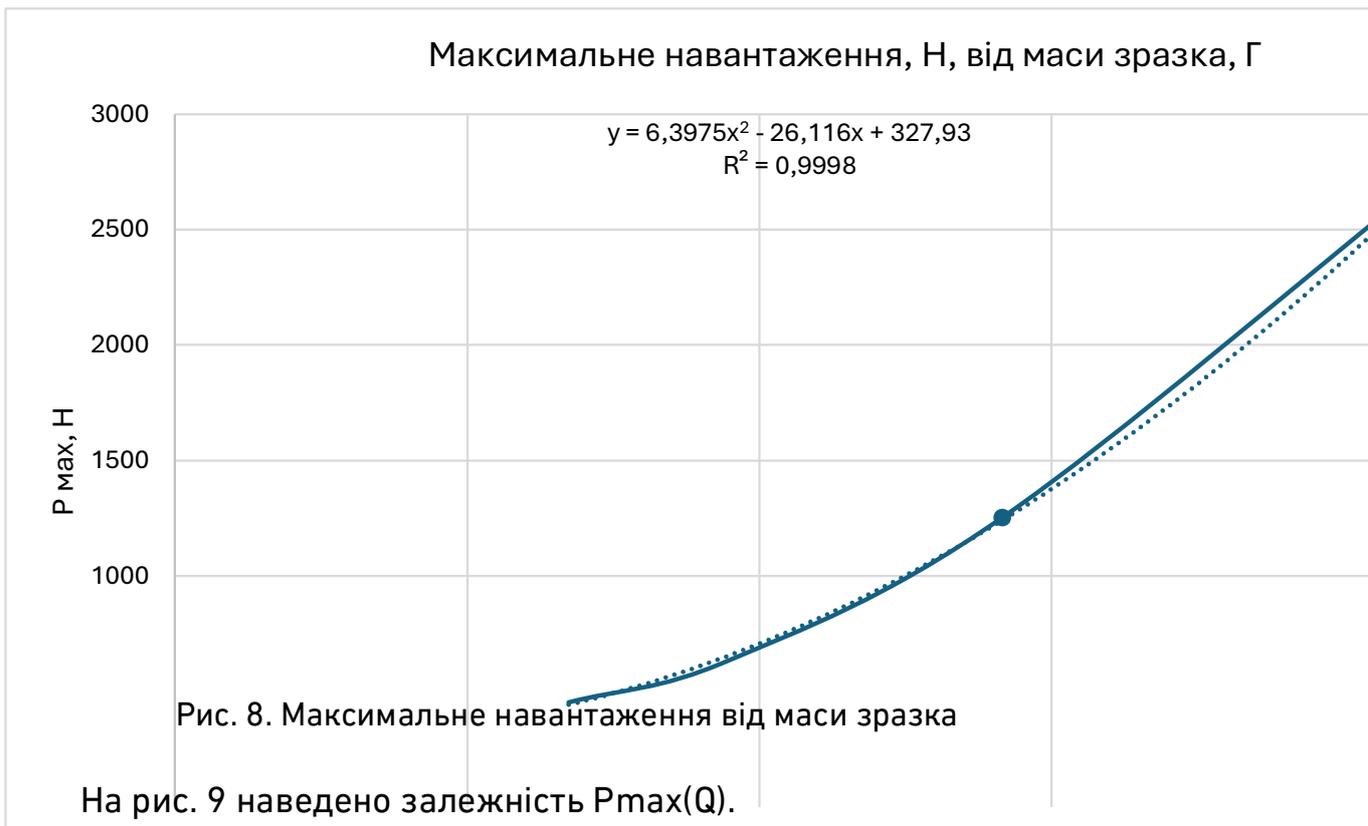


Рис. 7. Залежність маси зразка від доли заповнення

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



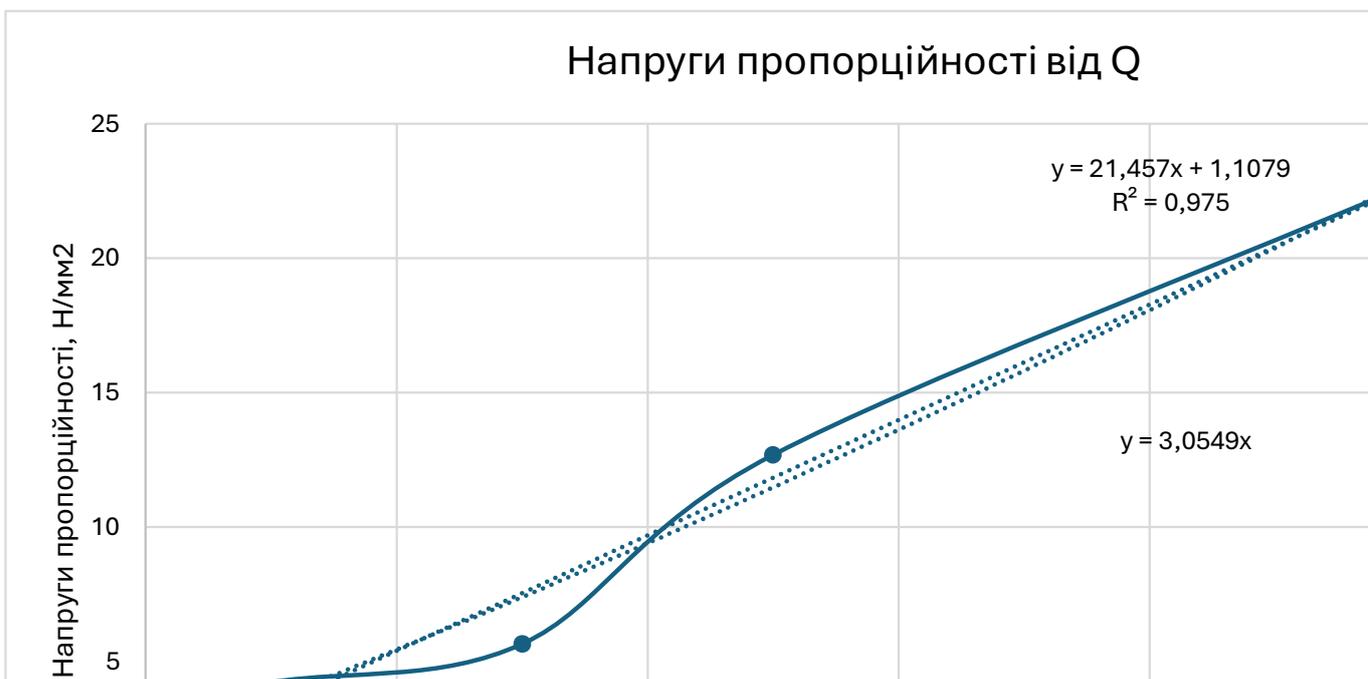


Рис. 10. Залежність напруг пропорційності від доли заповнення

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.

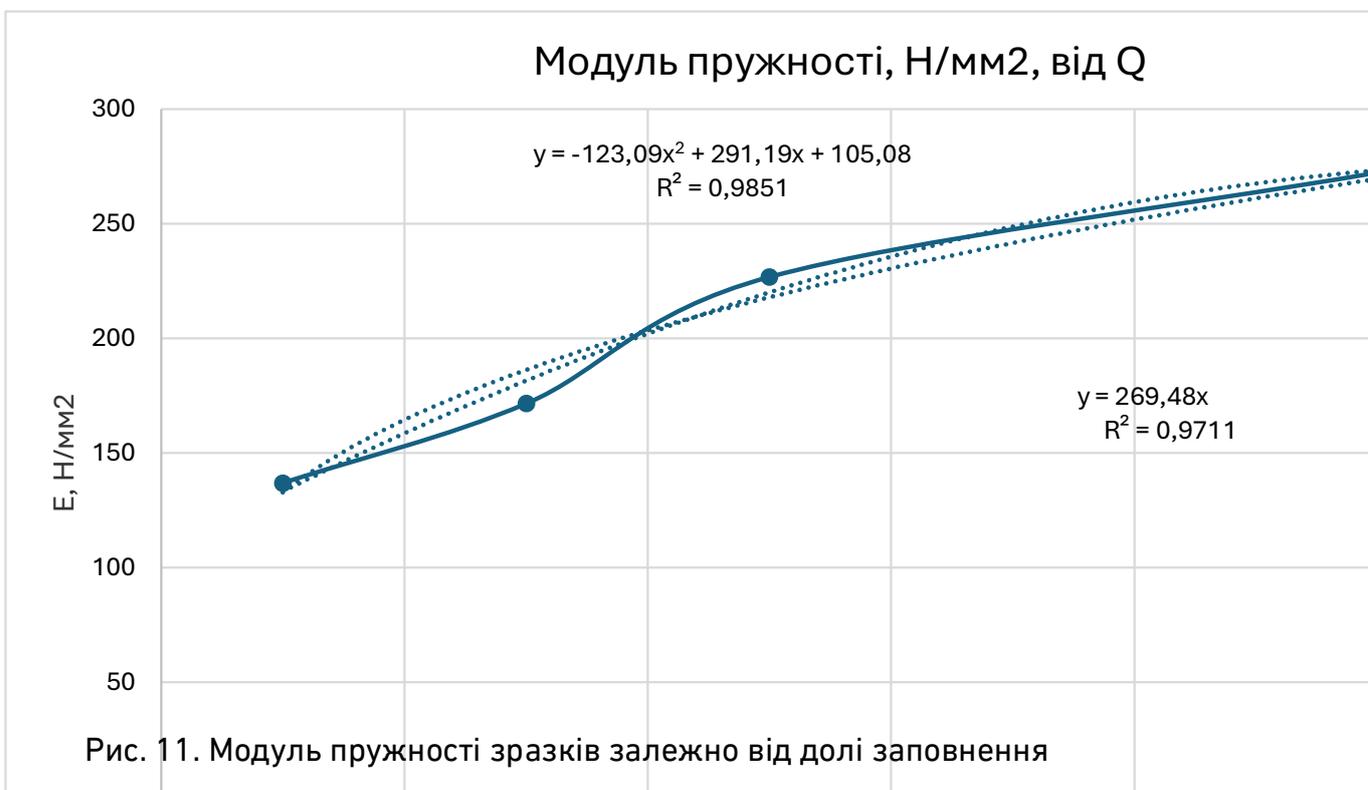
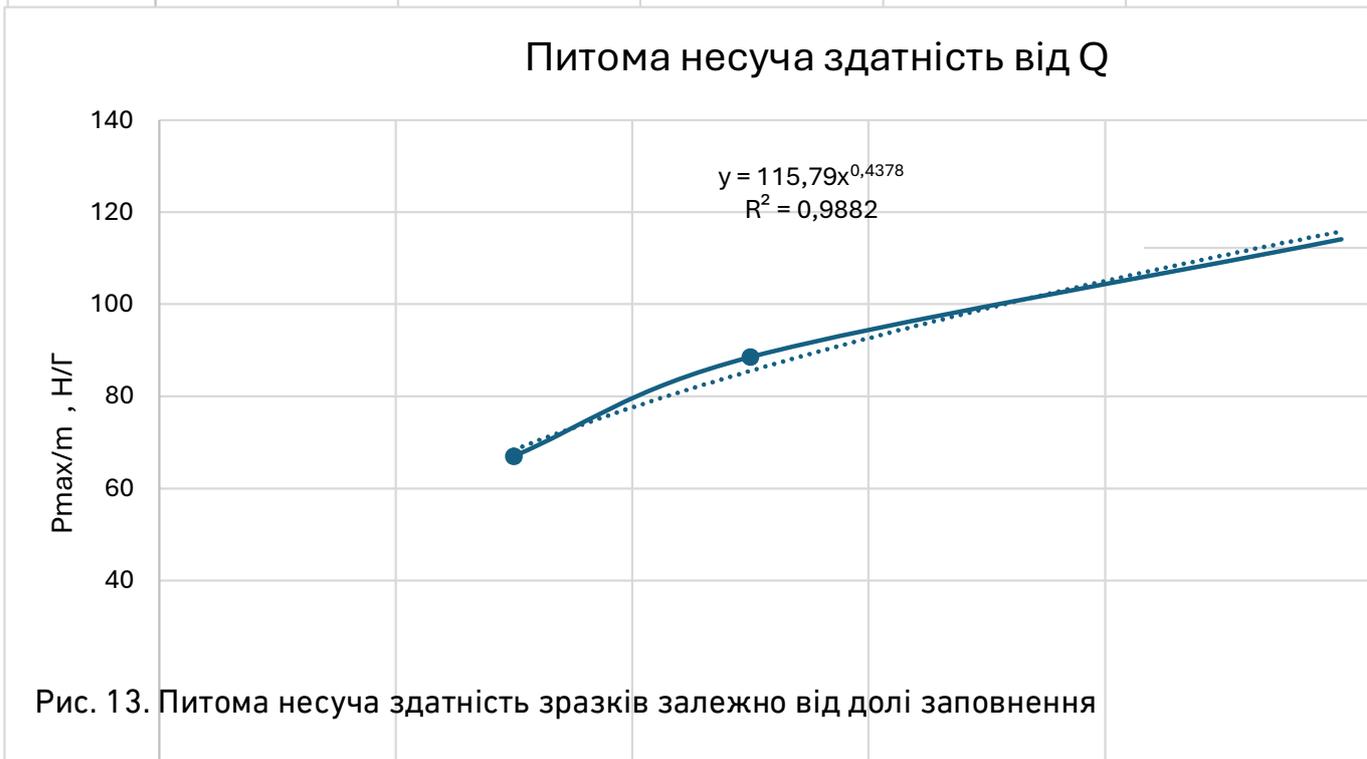
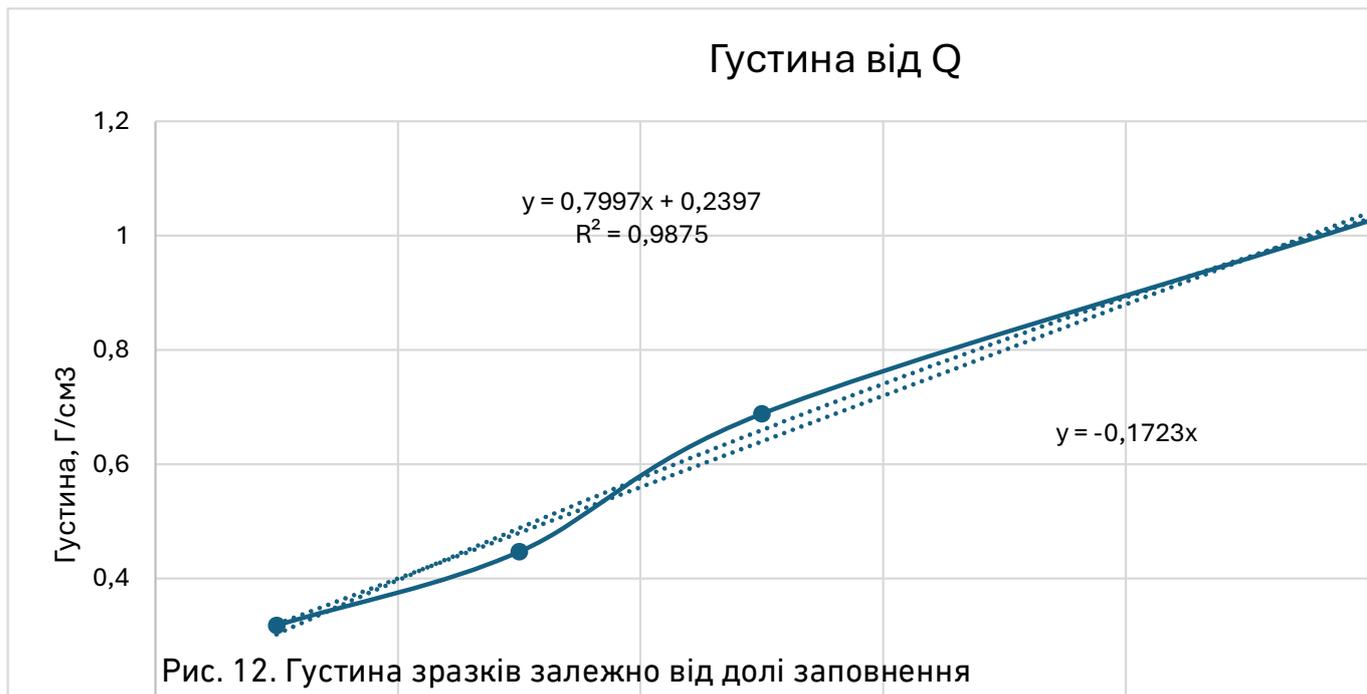


Рис. 11. Модуль пружності зразків залежно від доли заповнення



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

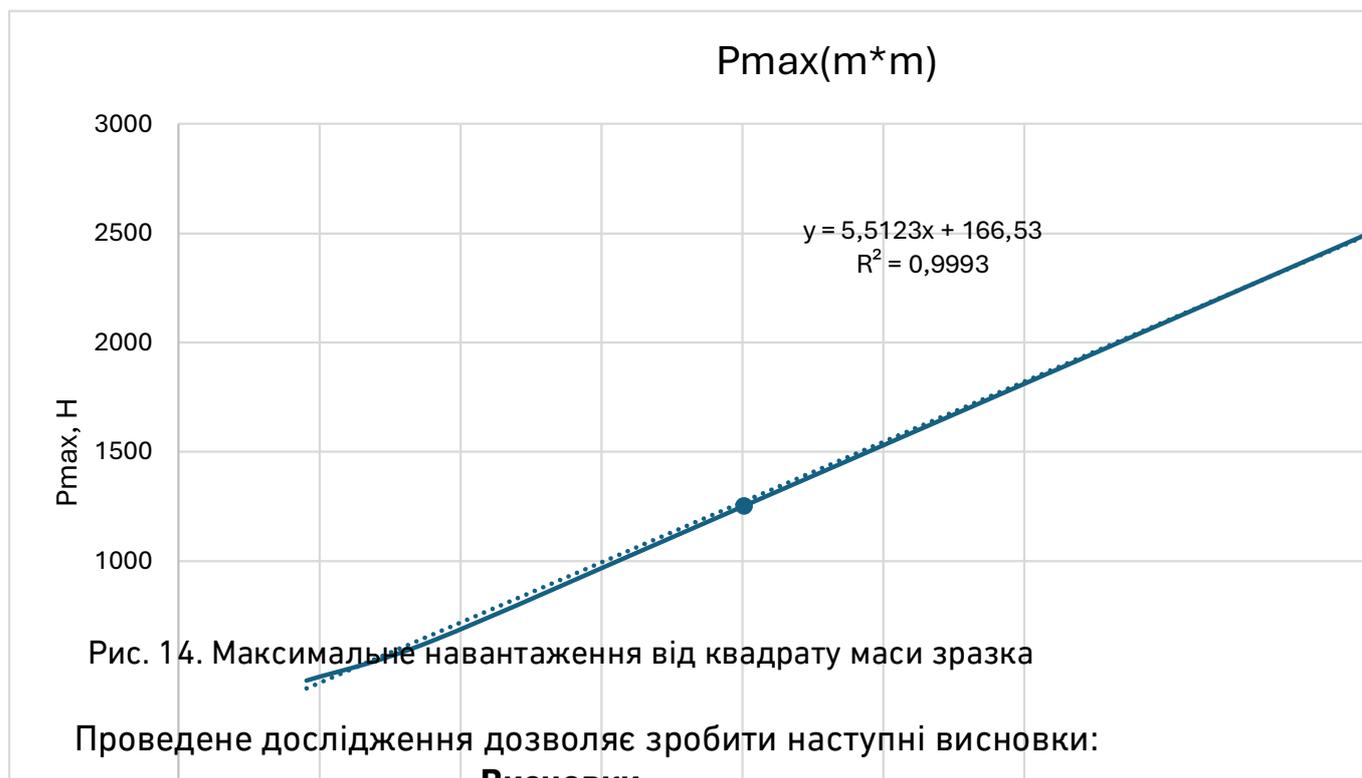


Рис. 14. Максимальне навантаження від квадрату маси зразка

Проведене дослідження дозволяє зробити наступні висновки:

Висновки

1. Розроблена методика 3D-друку стільникових 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/см³ ($Q = 10\%$) до $1,025$ г/см³ ($Q = 100\%$);
- відношення максимального та мінімального значень міцності на стиск становить σ_B^{max} при $Q = 100\%$ / σ_B^{min} при $Q = 10\%$ = $5,46$;
- відношення границі текучості σ_T^{max} при $Q = 100\%$ / σ_T^{min} при $Q = 10\%$ = $5,38$.

4. Відносна несуча здатність композитних зразків $\eta = P^{max} Q / mQ$ була найбільшою при $Q = 100\%$ і становила $1119,32$ Н/г. Для $Q = 50\%$ η 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%).



1. Грабар І. Г. Синтез мультифракталів. Житомир : Поліський національний університет, 2023. 200 с.
2. Грабар І. Г. Перколяційно-фрактальні моделі в сучасному матеріалознавстві. *Наукові нотатки : міжвузівський зб.* Луцьк, 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.* Київ, 2014. № 10. С. 22–27.
4. Грабар І. Г., Грабар О. І. Моделювання кінетики хаотизації аттрактора Фейгенбаума і динаміка нелінійних систем. *Фізико-математичний журнал.* Харків, 2012. Т. 14, № 3. С. 142–156.
5. Добреску Г., Папа Ф., Стейт Р. Фрактальний аналіз та фрактальна розмірність в хімії матеріалів. *Fractal and Fractional.* 2024. С. 583–590. DOI: 10.3390/fractalfract8100583.
6. Роман Г. Е., Чезура Ф., Маріам Р., Левченко І., Олександр К., Ріккарді Ч. Фрактальна геометрія поверхні полімерних матеріалів: площа поверхні та шорсткість. *Soft Matter.* 2024. С. 3082–3096. DOI: 10.1039/D3SM01497E.
7. Чжан Ю., Янг С.Х., Сінь Ю., Цай Б. та ін. Проектування симетричних градієнтних стільникових структур з високоефективним поглинанням мікрохвиль. *Nano-Micro Letters.* 2024. С. 234–245. DOI: 10.1007/s40820-024-01435-z.
8. Ендрю Дж. Дж., Хан К. А., Умер Р., Шиффер А. Поглинання енергії та п'єзорезистивні характеристики 3D-друкованих гібридних стільникових структур. *Advanced Materials Processing.* 2024. С. 324–337. DOI: 10.1080/17452759.2024.2342430.
9. Чжан Ч., Чен С., Донг Т., Хао Т., Ванг Дж. Дослідження вібраційних характеристик метаматеріалів з фрактальною стільниковою структурою. *Vibration and Acoustics.* 2024. С. 909–924. DOI: 10.1007/s42417-023-00883-y.
10. Донг Х., Ванг С., Ванг А., Лін Ц. та ін. Низькочастотна смуга пропускання та механізм придушення вібрації нового квадратного ієрархічного стільникового метаматеріалу. *Applied Mechanics.* 2024. С. 1841–1856. DOI: 10.1007/s10483-024-3168-7.
11. Хуан С., Чжан Ю., Хоу З., Сонг Ю. та ін. HoneyComb: Гнучка агентна система на основі LLM для матеріалознавства. *ArXiv.* 2024. С. 112–124. DOI: 10.48550/arXiv.2409.00135.
12. Сонг Х., Хонг С., Ванг Дж., Чжу Х. та ін. Механічні властивості стільникової структури з диспергованими наноматеріалами Fe₃O₄, надрукованими на 3D-принтері. *ACS Omega.* 2024. С. 14287–14296. DOI: 10.1021/acsomega.3c10138.
13. Ян Л., Хе Р., Ван Ц., Чжао Х. та ін. Аналіз хаотичних характеристик динамічної гравітаційної моделі з фрактальними структурами. *Fractal and Fractional.* 2023. С. 278–290. DOI: 10.3390/fractalfract7030278.
14. Офтадех Р., Хагпанах Б., Велла Д., Будауд А., Вазірі А. Оптимальні фрактально-подібні ієрархічні стільники. *Physical Review Letters.* 2014. С. 104301–104315. DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.104301.
15. Ячнюк І. О., Воробйов О. О., Романів Л. В., Ячнюк Ю. Б. Відновлювальні засоби працездатності у фізичній культурі і спорті. Чернівці, 2009. Книги XXI. 432 с.
16. Соколовський В. С., Романова Н. О., Юшковська О. П. Лікувальна фізична культура. Одеса : Одеський державний медичний університет, 2005. 234 с.
17. Гліненко Л. К., Сухонос О. Г. Основи моделювання технічних систем. Львів : Бескид Біт, 2003. 176 с.
18. Аулик І. В. Определение физической работоспособности.

Москва : Медицина, 1990. 192 с. **19.** Язловецький В. С. Основи діагностики функціонального стану та здоров'я. Кіровоград : [б.в.], 2003. 50 с. **20.** Сергієнко В. В. Філософські проблеми наукового пізнання. Кременчук : Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2011. 103 с.

REFERENCES:

1. Hrabar I. H. Syntez multyfraktaliv. Zhytomyr : Poliskyi natsionalnyi universytet, 2023. 200 s. **2.** Hrabar I. H. Perkoliatsiino-fraktalni modeli v suchasnomu materialoznavstvi. *Naukovi notatky* : mizhvuzivskyi zb. Lutsk, 2015. Vyp. 49. S. 35–37. **3.** Hrabar I. H. Pryskorene prohnozuvannia resursu konstruktsii na stadii proiektuvannia ta universalna diahrama. *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*. Kyiv, 2014. № 10. S. 22–27. **4.** Hrabar I. H., Hrabar O. I. Modeliuvannia kinetyky khaotyzatsii attraktora Feihenbauma i dynamika neliniinykh system. *Fizyko-matematychnyi zhurnal*. Kharkiv, 2012. T. 14, № 3. S. 142–156. **5.** Dobresku H., Papa F., Steit R. Fraktalny analiz ta fraktalna rozmirnist v khimii materialiv. *Fractal and Fractional*. 2024. S. 583–590. DOI: 10.3390/fractalfract8100583. **6.** Roman H. E., Chezura F., Mariam R., Levchenko I., Oleksandr K., Rikkardi Ch. Fraktalna heometriia poverkhni polimernykh materialiv: ploshcha poverkhni ta shorstkist. *Soft Matter*. 2024. S. 3082–3096. DOI: 10.1039/D3SM01497E. **7.** Chzhan Yu., Yanh S.Kh., Sin Yu., Tsai B. ta in. Proiektuvannia symetrychnykh hradiientnykh stilnykovykh struktur z vysokoefektyvnym pohlynanniam mikrokhvyl. *Nano-Micro Letters*. 2024. S. 234–245. DOI: 10.1007/s40820-024-01435-z. **8.** Endriu Dzh. Dzh., Khan K. A., Umer R., Shyffer A. Pohlynannia enerhii ta piezorezystyvni kharakterystyky 3D-drukovanykh hibrydnykh stilnykovykh struktur. *Advanced Materials Processing*. 2024. S. 324–337. DOI: 10.1080/17452759.2024.2342430. **9.** Chzhan Ch., Chen S., Donh T., Khao T., Vanh Dzh. Doslidzhennia vibratsiinykh kharakterystyk metamaterialiv z fraktalnoiu stilnykovoiu strukturoiu. *Vibration and Acoustics*. 2024. S. 909–924. DOI: 10.1007/s42417-023-00883-y. **10.** Donh Kh., Vanh S., Vanh A., Lin Ts. ta in. Nyzkochastotna smuha propuskannia ta mekhanizm prydushennia vibratsii novoho kvadratnoho iierarkhichnoho stilnykovoho metamaterialu. *Applied Mechanics*. 2024. S. 1841–1856. DOI: 10.1007/s10483-024-3168-7. **11.** Khuan S., Chzhan Yu., Khou Z., Sonh Yu. ta in. HoneyComb: Hnuchka ahentna systema na osnovi LLM dlia materialoznavstva. *ArXiv*. 2024. S. 112–124. DOI: 10.48550/arXiv.2409.00135. **12.** Sonh Kh., Khonh S., Vanh Dzh., Chzhu Kh. ta in. Mekhanichni vlastyvoli stilnykovoi struktury z dysperhovanymy nanomaterialamy Fe₃O₄, nadrukovanymy na 3D-prynteri. *ACS Omega*. 2024. S. 14287–14296. DOI: 10.1021/acsomega.3c10138. **13.** Yan L., Khe R., Van Ts., Chzhao Kh. ta in. Analiz khaotychnykh kharakterystyk dynamichnoi hravitatsiinoi modeli z fraktalnymy strukturamy. *Fractal and Fractional*. 2023. S. 278–290. DOI: 10.3390/fractalfract7030278. **14.** Oftadekh R., Khahpanakh B.,



Vella D., Budaud A., Vaziri A. Optymalni fraktalno-podibni iierarkhichni stilnyky. *Physical Review Letters*. 2014. S. 104301–104315. DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.104301. **15.** Yachniuk I. O., Vorobiov O. O., Romaniv L. V., Yachniuk Yu. B. Vidnovliuvalni zasoby pratsezdatnosti u fizychnii kulturi i sporti. Chernivtsi, 2009. Knyhy XXI. 432 s. **16.** Sokolovskyi V. S., Romanova N. O., Yushkovska O. P. Likuvalna fizychna kultura. Odesa : Odeskyi derzhavnyi medychnyi universytet, 2005. 234 s. **17.** Hlinenko L. K., Sukhonosov O. H. Osnovy modeliuvannya tekhnichnykh system. Lviv : Beskyd Bit, 2003. 176 s. **18.** Aulyk I. V. Opredelenye fizycheskoi rabotosposobnosti. Moskva : Medytsyna, 1990. 192 s. **19.** Yazlovetskyi V. S. Osnovy diahnostyky funktsionalnoho stanu ta zdorovia. Kirovohrad : [b.v.], 2003. 50 s. **20.** Serhiienko V. V. Filozofski problemy naukovooho piznannia. Kremenchuk : Kremenchutskyi natsionalnyi universytet imeni Mykhaila Ostrohradskoho, 2011. 103 s.

Hrabar I. H., Doctor of Engineering, Professor, Kulman S. M., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Ksiukovskyi O. V., Post-graduate Student, Dubovyk D. A., Post-graduate Student (Polissya National University, Zhytomyr)

DESIGN, 3D PRINTING AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF PERCOLATION-FRACTAL COMPOSITE STRUCTURAL ELEMENTS

The article presents the results of research on fractal-honeycomb composite structural elements manufactured by 3D printing. The research is aimed at assessing the mechanical characteristics of the material depending on the level of filling of the internal structure ($Q = 10\%$, 30% , 50% , 100%). A method for calculating and manufacturing samples has been developed, which allows adapting their mechanical properties in accordance with the specified operating conditions. A series of experimental compression tests were conducted, which demonstrated significant changes in the mass, density, strength and load-bearing capacity of the samples depending on the filling level. The test results showed that the relative load-bearing capacity of the samples increases with increasing filling density, reaching a maximum value at $Q = 100\%$, while at lower filling levels a significant decrease in strength characteristics is observed. Analysis of the obtained data confirms the feasibility of using composite materials with a fractal structure to create adaptive elements in various fields of engineering and medicine. In particular, a promising direction is their application in the

production of orthopedic implants and prostheses, drones, aircraft and copter-type UAVs. This opens up new opportunities for the development of lightweight, durable and biocompatible structures that combine high mechanical characteristics with optimized aerodynamics.

***Keywords:* 3D printing (FDM); fractal-honeycomb composites; filling density; mechanical properties.**