

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПЕРФОРАЦІЇ НА ДЕМПФУВАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ 3D-ДРУКОВАНИХ TPU-ЛАЙНЕРІВ

Б.С. Місан, Д.О. Нікітін, О.С. Пащенко

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: bohdan.misan@nure.ua, dmytro.nikitin@nure.ua, oleksandr.pashchenko@nure.ua

Анотація: У роботі досліджено демпфувальні властивості амортизувальних TPU-лайнєрів, виготовлених методом адитивного FFF/FDM 3D-друку з керованою внутрішньою перфорацією. Проведено експериментальний аналіз впливу жорсткості матеріалу, форми отворів та ступеня перфорації на ефективність гасіння вібрацій. Встановлено, що демпфувальні властивості мають нелінійну залежність від ступеня перфорації з наявністю оптимуму. Показано, що максимальна ефективність гасіння досягається при перфорації близько 60%, а шестикутна структура забезпечує найкращі показники демпфування. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструкцій демпфувальних елементів у протезних та інженерних системах.

Ключові слова: TPU, 3D-друк, демпфування, перфорація, вібрації, протези.

A STUDY OF THE EFFECT OF PERFORATION PARAMETERS ON THE DAMPING PROPERTIES OF 3D-PRINTED TPU LINERS

B. Misan, D. Nikitin, O. Paschenko

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Science Avenue 14

E-mail: bohdan.misan@nure.ua, dmytro.nikitin@nure.ua, oleksandr.pashchenko@nure.ua

Annotation: This study investigates the damping properties of shock-absorbing TPU liners manufactured using additive FFF/FDM 3D printing with controlled internal perforation. An experimental analysis was conducted to assess the influence of material stiffness, hole shape, and degree of perforation on vibration damping efficiency. It was found that the damping properties exhibit a nonlinear dependence on the degree of perforation, with an optimal value. It was shown that maximum damping efficiency is achieved at a perforation rate of approximately 60%, and a hexagonal structure provides the best damping performance. The results obtained can be used to optimize the designs of damping elements in prosthetic and engineering systems.

Key words: TPU, 3D printing, shock absorption, perforation, vibrations, prosthetics.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Амортизувальні лайнери є критичним елементом протезів нижніх кінцівок, оскільки вони зменшують передачу ударних навантажень і вібрацій до м'яких тканин кукси [1-3]. Використання 3D-друку дозволяє створювати вироби з керованою внутрішньою структурою, однак вплив параметрів перфорації на демпфувальні властивості потребує детального дослідження.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ. Дослідити вплив жорсткості TPU, форми отворів і ступеня перфорації на ефективність гасіння вібрацій та визначити оптимальні параметри структури лайнерів.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Для експериментального дослідження демпфувальних властивостей виготовлено зразки амортизувальних вкладишів для ножних протезів із термопластичного поліуретану (TPU) методом FFF/FDM 3D-друку, що забезпечує відтворюваність геометрії та можливість керування внутрішньою структурою [4].

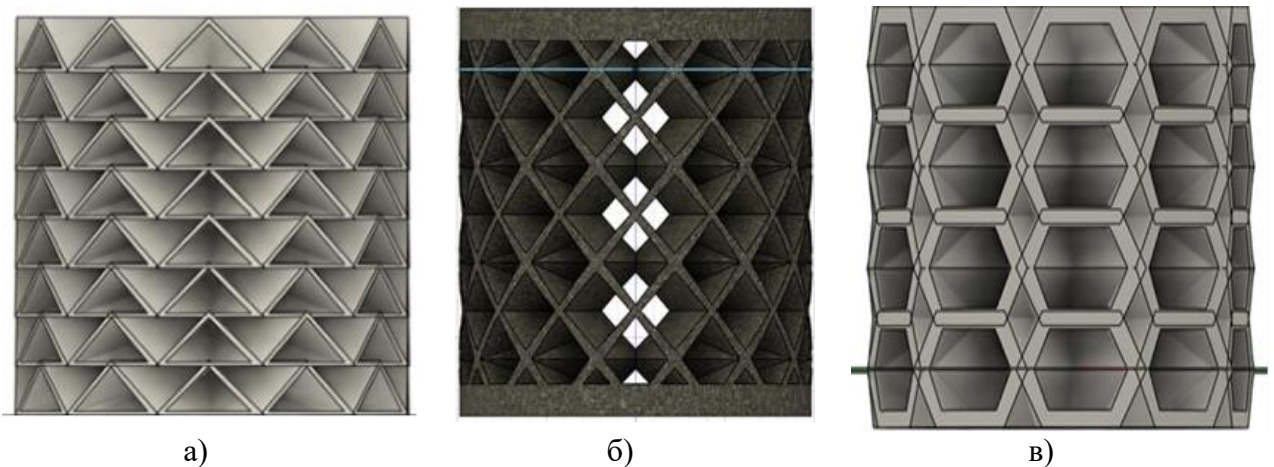
У дослідженні використано TPU з твердістю 50A, 80A та 90A, що дозволило оцінити вплив механічних властивостей матеріалу на ефективність гасіння вібрацій. Зі зміною твердості змінюються в'язкопружні характеристики матеріалу, зокрема його здатність до деформації та розсіювання енергії [5, 6].

Для керування демпфувальними властивостями застосовано регулярну перфорацію з параметрами: форма отворів (трикутна, ромбічна, шестикутна) (рис. 1) та ступінь перфорації (40%, 60%, 80%). Геометрія отворів визначає характер розподілу напружень і деформацій, що впливає на механізм розсіювання енергії [7, 8].

Трикутна перфорація спричиняє концентрацію напружень і знижує ефективність демпфування. Ромбічна забезпечує більш рівномірний розподіл напружень і середні показники гасіння. Найкращі результати демонструє шестикутна структура, яка формує квазіізотропну систему з ефективним розсіюванням енергії.

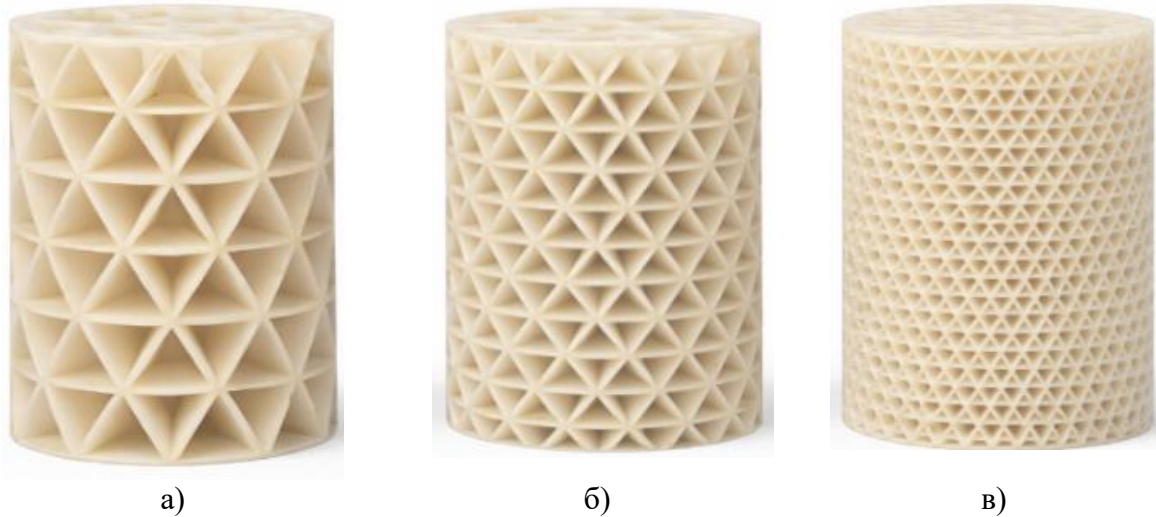
Ступінь перфорації визначає баланс між жорсткістю та деформаційною здатністю: її збільшення підвищує демпфування до певного рівня, після чого ефективність зменшується через ослаблення конструкції. Це підтверджує наявність оптимального діапазону перфорації.

Таким чином, основний вплив на демпфувальні властивості мають жорсткість матеріалу та ступінь перфорації, тоді як форма отворів виконує коригуючу роль.



а) – трикутна перфорація; б) – ромбічна перфорація; в) – шестикутна перфорація
Рисунок 1 – Моделі тестових зразків

Ступінь перфорації визначався як відношення площі отворів до загальної площі поперечного перерізу зразка, рис. 2. Зміна форми та відсотка перфорації дозволяла варіювати ефективну жорсткість і внутрішні втрати енергії матеріалу без зміни зовнішніх розмірів виробу.

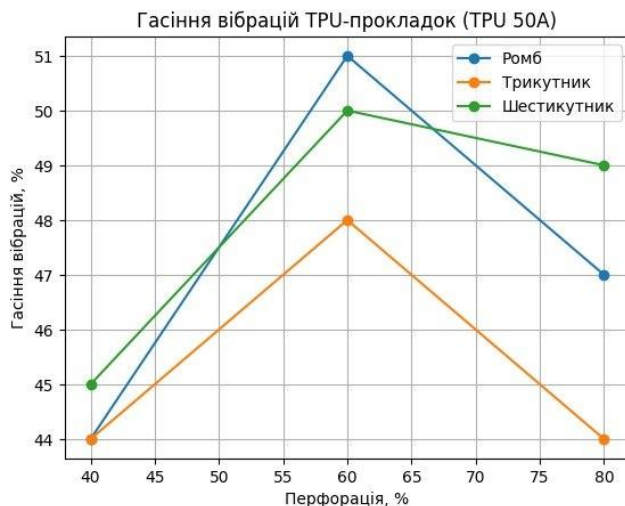


а) – зразок з відсотком перфорації 40%; б) – зразок з відсотком перфорації 60%; в) – зразок з відсотком перфорації 80%

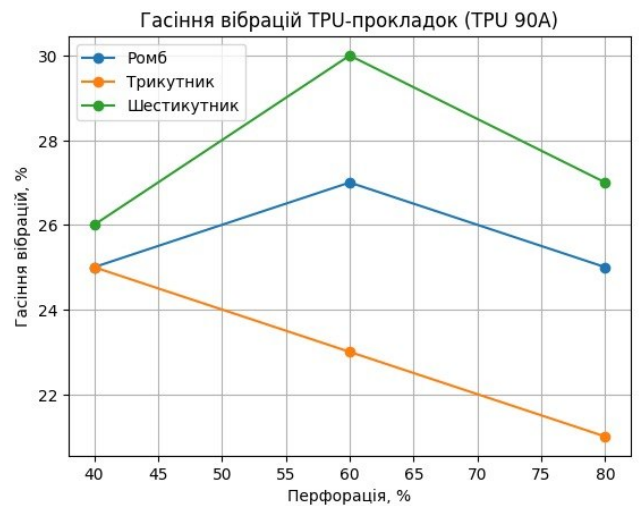
Рисунок 2 – Приклади різного відсотку перфорації

Усі тестові зразки мали циліндричну форму з фіксованими зовнішніми розмірами, діаметр 40 мм, а висота 60 мм. Зовнішні габарити зразків залишалися незмінними для забезпечення коректного порівняння результатів і виключення впливу геометричних факторів, не пов'язаних з внутрішньою структурою.

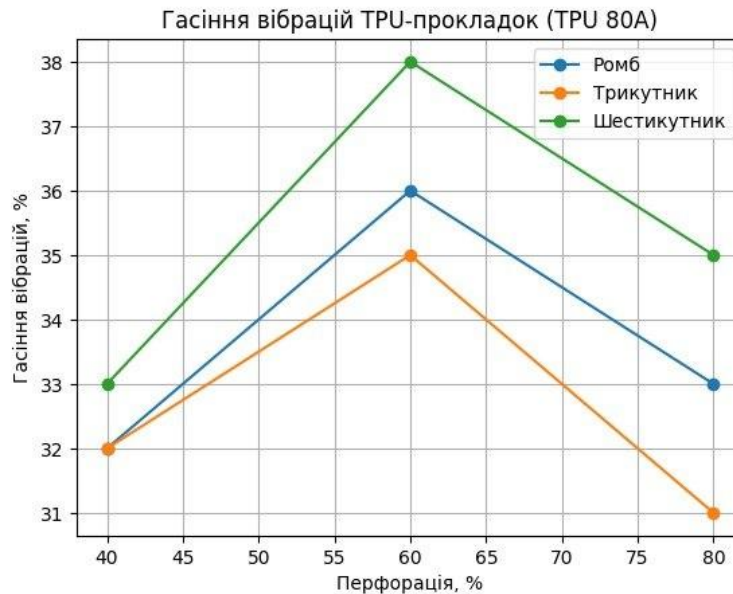
Аналіз експериментальних даних, наведених у табл. та представлених графічно на рис. 3, показує, що ефективність гасіння вібрацій залежить від поєднання жорсткості TPU, форми отворів і ступеня перфорації. Для всіх досліджених матеріалів спостерігається нелінійна залежність: максимальні значення демпфування досягаються переважно при 60% перфорації, після чого при 80% відбувається зниження ефективності.



а)



б)



в)

а – гасіння вібрації TPU прокладки (50A); б – гасіння вібрації TPU прокладки (80A); в – гасіння вібрації TPU прокладки (90A)

Рисунок 3 – Результати дослідження

ВИСНОВКИ. Аналіз побудованих графіків показує, що для всіх досліджених зразків характерною є нелінійна залежність ефективності гасіння вібрацій від ступеня перфорації TPU-прокладок. Зі збільшенням відсотка перфорації від 40% до проміжних значень (близько 60%) спостерігається зростання демпфувальної здатності, після чого при подальшому збільшенні перфорації до 80% ефективність гасіння зменшується.

Наявність такого екстремуму свідчить про конкуренцію двох фізичних механізмів:

- з одного боку, збільшення перфорації підвищує деформаційну здатність матеріалу та внутрішні в'язкопружні втрати;

- з іншого боку, надмірне ослаблення структури призводить до зниження ефективної жорсткості та погіршення передачі енергії у демпфувальні механізми.

Таким чином, ступінь перфорації не може розглядатися як монотонний фактор, а має оптимальне значення, яке забезпечує баланс між жорсткістю та демпфуванням.

Порівняння графіків для різних значень жорсткості TPU показує чітку закономірність: зі збільшенням жорсткості матеріалу рівень гасіння вібрацій систематично зменшується.

Для досліджених зразків максимальні значення гасіння становлять: до $\approx 51\%$ для TPU з жорсткістю 50A; до $\approx 38\%$ для TPU 80A; до $\approx 30\%$ для TPU 90A.

Це пояснюється зменшенням внутрішніх втрат енергії, притаманних в'язкопружній поведінці еластомерів. М'які TPU (50A) здатні до значних зсувних та об'ємних деформацій, що супроводжуються високим рівнем гістерезисних втрат. Для жорстких TPU (90A) деформації є обмеженими, внаслідок чого більша частина енергії коливань не розсіюється, а повертається в систему.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ahn, S.J., Lee, H. and Cho, K.-J. (2024) "3D printing with a 3D printed digital material filament for programming functional gradients", Nature Communications, 15, 3605. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47480-5>

2. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S. and Filippenko, I. (2020) "Development of an architectural-logical model to automate the management of the process of creating complex cyber-physical industrial systems", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/3(106), pp. 52–58. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.210761>
3. Нікітін, Д. О., Невлюдов, І. Ш., Жарікова, І. В., Бронніков, А. І., & Стрілець, Р. Є. (2025). Розробка методу контролю виробів під час фотополімерного 3D-друку. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1 (136), 42–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335706>
4. Rudenko O., Bezsonov O., Pyunin O., Demirskiy O., Serdiuk N., Arsenyeva O., Semenenko O., 2023, Using a Neural Network Approach to Predict Deposits on the Surfaces of Heat Exchange Equipment, *Chemical Engineering Transactions*, 103, 697-702. <https://doi.org/10.3303/CET23103117>
5. Hassan Beygi, B. and Wong, M.S. (2023) "Contemporary and future development of 3D printing technology in the field of assistive technology, orthotics and prosthetics", *Canadian Prosthetics & Orthotics Journal*, 6(2), 42225. DOI: <https://doi.org/10.33137/cpoj.v6i2.42225>
6. Devin, K.M., Tang, J., Hamilton, A.R., Moser, D. and Jiang, L. (2024) "Assessment of 3D-printed mechanical metamaterials for prosthetic liners", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 238(3), 348–357. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544119231225529>
7. Nevliudov, A. Bronnikov, O. Chala and R. Allakhveranov, "Improvement and Optimization of Automated Logistics Processes in Logistics Premises," 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2023, pp. 1, doi: 10.1109/MEES61502.2023.10402386.
8. Plesec, V., Hanželič, B. and Harih, G. (2024) "Development of a metamaterial numerical model for improving 3D-printed lower-limb prosthetic liners", *Human Systems Engineering and Design (IHSED 2024): Future Trends and Applications*, 158, 228–238. DOI: <https://doi.org/10.54941/ahfe1005546>
10. 1. Abu-Jassar AT, Attar H, Amer A, et al. Development and Investigation of Vision System for a Small-Sized Mobile Humanoid Robot in a Smart Environment. *International Journal of Crowd Science*, 2025, 9(1): 29-43. <https://doi.org/10.26599/IJCS.2023.9100018>
11. Syed Khalid Mustafa, Vladyslav Yevsieiev, Igor Nevliudov, Vyacheslav Lyashenko, Adel R. Alharbi, Wahid Rajeh, "HMI Development Automation with GUI Elements for Object-Oriented Programming Languages Implementation," *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, vol. 70, no. 1, pp. 139-145, 2022. Crossref, <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V70I1P215>
12. Bortnikova, V., Yevsieiev, V., Beskorovainyi, V., Nevliudov, I., Botsman, I., & Maksymova, S. (2019). Structural Parameters Influence on a Soft Robotic Manipulator Finger Bend Angle Simulation. 2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), 35-38. <https://doi.org/10.1109/CADSM.2019.8779300>
13. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gopejenko, V., & Kosenko, V. (2025). DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL SUPPORT FOR ADAPTIVE CONTROL FOR THE INTELLIGENT GRIPPER OF THE COLLABORATIVE ROBOT MANIPULATOR. *Advanced Information Systems*, 9(3), 57–65. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.3.07>
14. Yevsieiev, V., Gurin, D., Kulish, S., & Voloshyn, Y. (2025). Development of a partially supervised Markov decision-making model for a 3-link collaborative robot-manipulator. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2025(4), 83-94. doi:<https://doi.org/10.32620/reks.2025.4.06>