

*МІСАН Б. С., НІКІТІН Д. О.*

## **ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ АМОРТИЗУВАЛЬНОГО ВКЛАДИША ДЛЯ НОЖНИХ ПРОТЕЗІВ**

Досліджено метод тестування амортизувального вкладиша для ножних протезів, виготовленого з використанням технології адитивного FFF/FDM 3D-друку. Метод базується на ударному імпульсі та аналізі вільних затухаючих коливань, який призначений для кількісної оцінки демпфувальних властивостей вкладиша. Особливу увагу було приділено дослідженню динамічних і в'язкопружних процесів у конструкції амортизованого вкладишу та матеріалу під дією ударних навантажень. Визначено основні параметри вкладишу, які впливають на гасіння вібрації, а саме: жорсткість матеріалу, ступінь і форму внутрішньої перфорації. Запропонований метод та конструкція тестового макету дозволяє порівнювати різні конструктивні варіанти амортизувальних вкладишів та може бути використаний для оптимізації протезних систем з метою зменшення динамічних навантажень і підвищення комфорту користувачів.

**Ключові слова:** метод тестування, ножний протез, амортизувальний вкладиш, 3D-друк, TPU, гасіння вібрації, ударний метод.

**MISAN B., NIKITIN D.**

### **USE OF 3D PRINTING TECHNOLOGY FOR THE MANUFACTURE AND TESTING OF SHOCK-ABSORBING INSERTS FOR LEG PROSTHESES**

A method for testing shock-absorbing inserts for leg prostheses manufactured using additive FFF/FDM 3D printing technology was investigated. The method is based on impact pulse and analysis of free damped oscillations, which is designed to quantitatively assess the damping properties of the insert. Particular attention was paid to the study of dynamic and viscoelastic processes in the design of the shock-absorbing insert and material under impact loads. The main parameters of the insert that affect vibration damping were determined, namely: material stiffness, degree and shape of internal perforation. The proposed method and design of the test model allows comparing different design options for shock-absorbing inserts and can be used to optimize prosthetic systems in order to reduce dynamic loads and increase user comfort.

**Keywords:** testing method, foot prosthesis, shock-absorbing insert, 3D printing, TPU, vibration damping, impact method.

**Вступ.** Сучасні розвиток у сфері протезобудування характеризуються зростанням вимог до об'єктивного визначення динамічних навантажень, які виникають від опорної поверхні до користувача протеза. Важливу роль у забезпеченні комфортного використання протеза його безпеки та експлуатаційної надійності відіграє ефективність гасіння ударних і вібраційних навантажень, які виникають у процесі ходьби. Одним з методів для зменшення таких навантажень є застосування амортизувальних вкладишів з в'язкопружних полімерних матеріалів, які виготовляються із використанням технологій адитивного 3D-друку [1-3]. Адитивне виробництво за технологією FFF/FDM, дозволяє створювати вироби з прогнозованою внутрішню структуру та поведінкою при експлуатації, зокрема шляхом зміни ступеня та геометрії перфорації, що відкриває можливості оптимізації демпфувальних властивостей в залежності від особливостей анатомії користувача. Водночас ефективне впровадження таких рішень потребує надійних, відтворюваних та автоматизованих методів контролю та тестування, здатних забезпечити оцінку амортизувальних властивостей виробу. Особливий інтерес у цьому напрямку становить ударний метод тестування зразків, що базується на аналізі вільних затухаючих коливань після імпульсного збудження. Даний підхід дозволяє адекватно відтворювати умови ударного навантаження, близькі до реальних експлуатаційних режимів ножних протезів з можливістю підбору навантаження з урахуванням особливостей анатомії користувача, та досліджувати в'язкопружні й коливальні процеси в матеріалі амортизувального вкладиша [4-7]. Разом із тим, під час розроблення методу тестування амортизувальних вкладишів необхідно розв'язати низку ключових проблем, а саме: забезпечення відтворюваного та об'єктивного збудження динамічних навантажень, що відповідають реальним умовам експлуатації ножних протезів; запобігання виникненню паразитних резонансних явищ у вимірювальному макеті, які можуть спотворювати результати тестування; автоматизація процесу збору та обробки експериментальних даних, що дозволяє мінімізувати вплив людського фактора, підвищити точність визначення параметрів демпфування та забезпечити порівнюваність результатів; інтеграція методу тестування в єдину експериментальну систему, яка поєднує механічну частину, вимірювальні датчики та програмні засоби аналізу [8-11]. Таким чином, розробка автоматизованого методу контролю та тестування друкованих амортизувальних вкладишів для ножних протезів з використанням ударного методу – є актуальним науково-прикладним завданням, особливо в Україні під час війни. Спрямованим на підвищення достовірності оцінювання демпфувальних властивостей, оптимізацію конструкції протезних компонентів і покращення комфорту користувачів.

#### **Мета дослідження.**

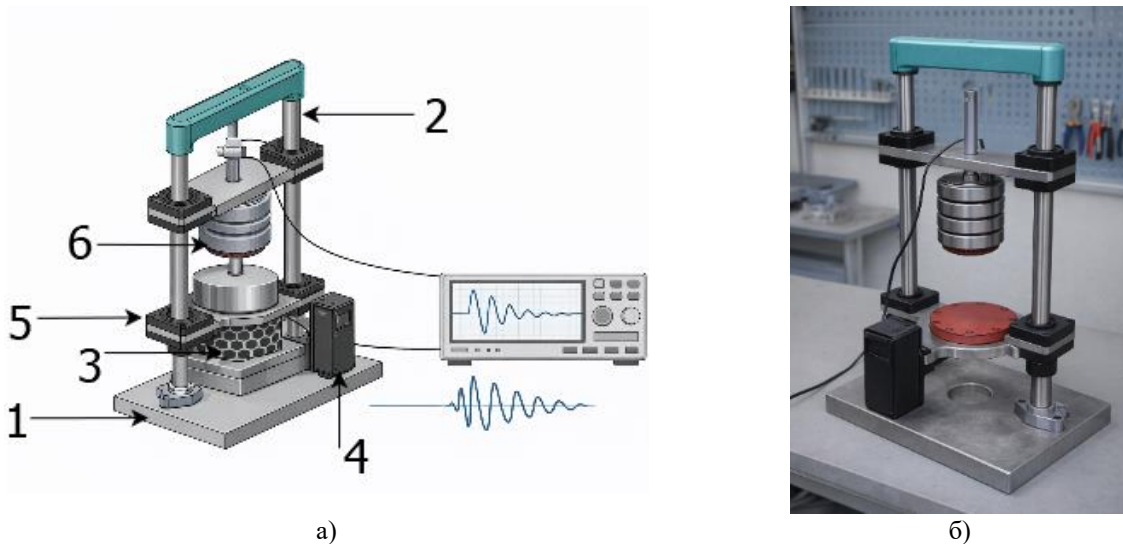
Дослідження спрямовані на розробку та обґрунтування автоматизованого методу тестування амортизувального вкладиша для ножних протезів, виготовленого з використанням технології адитивного FFF/FDM 3D-друку, з метою оцінки ефективності гасіння ударних і вібраційних навантажень при експлуатації протеза. Особлива увага приділяється дослідженню конструкції вкладишу з термопластичного поліуретану (TPU) та його реакції під час ударного збудження, а також розробці методики автоматизованого збору та обробки експериментальних даних, яка забезпечує відтворюваність та об'єктивність результатів тестування. Об'єктом дослідження є процес гасіння ударних та вібраційних навантажень у амортизувальних вкладишах ножних протезів за умов динамічного навантаження.

Предметом дослідження є матеріальні та конструктивні параметри амортизувального вкладиша, а також методичні та експериментальні параметри ударного тестування, що описують процес демпфування та визначають ефективність гасіння вібрацій.

**Розробка системи фіксації вібраційних сигналів.**

Для оцінки демпфувальних властивостей амортизувальних вкладишів був використаний ударний метод тестування, який базується на вільних затухаючих коливань. Він дозволяє кількісно визначити ефективність гасіння вібрацій за умов імпульсного навантаження. Досліджуваний зразок встановлювався між жорсткою опорною плитою та інерційним навантаженням (молот), утворюючи механічну систему з нерухомою опорою вільною масою яка рухаються перпендикулярно вниз до опори, та прокладкою між ними (тестовий зразок).

Коливальний процес збуджувався короткочасним механічним ударом, після чого система переходила у режим вільних коливань, що затухають з часом. Реєстрація коливальної відповіді здійснювалася за допомогою акселерометра, закріпленого на ударній площадці макету, рис. 1.



а) 1 – основа макету; 2 – напрямна для ударного молоту; 3 – тестовий зразок; 4 – блок для датчику акселерометра; 5 – ударна площадка; 6 – ударний молот.  
 б) Розроблений макет за цією схемою

Рис. 1 – Принцип дії макету для ударного тестування зразків (а) та розроблений макет за цією схемою (б)

Отриманий часовий сигнал прискорення використовувався для визначення амплітуд послідовних піків коливань  $x_n$  та  $x_{n+1}$ , які характеризують швидкість затухання коливального процесу у системі.

Відсоток гасіння вібрацій визначався за співвідношенням:

$$D = \left(1 - \frac{x_{n+1}}{x_n}\right) \cdot 100\%. \tag{1}$$

Де:  $x_n$  та  $x_{n+1}$  – амплітуди двох послідовних коливальних циклів.

Зазначений показник характеризує відносне зменшення амплітуди коливань за один період і використовується для порівняльної оцінки демпфувальних властивостей зразків з різними матеріальними та конструктивними параметрами виробу.

Для кількісної оцінки демпфувальних властивостей використовувалися амплітуди двох послідовних коливальних циклів (наприклад  $x_3$  які дорівнює 6,1 та  $x_4$  амплітуда коливань яких дорівнює 4,8), за якими визначався відсоток гасіння вібрацій тестового зразка. Швидше зменшення амплітуди свідчить про вищу ефективність гасіння вібрацій амортизувальним елементом, рис. 2. Таким чином відсоток гасіння вібрації  $D$  буде дорівнювати:

$$D = \left(1 - \frac{x_{n+1}}{x_n}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{4,8}{6,1}\right) \cdot 100\% \approx 21,3. \tag{2}$$

Отримане значення відсотка гасіння  $D \approx 21,3\%$  показує ефективну демпфувальну дію амортизувального вкладиша та вказує на швидке затухання вільних коливань після ударного збудження. Чим більшим є значення  $D$ , тим вищою є здатність матеріалу та його внутрішньої структури поглинати механічну енергію.

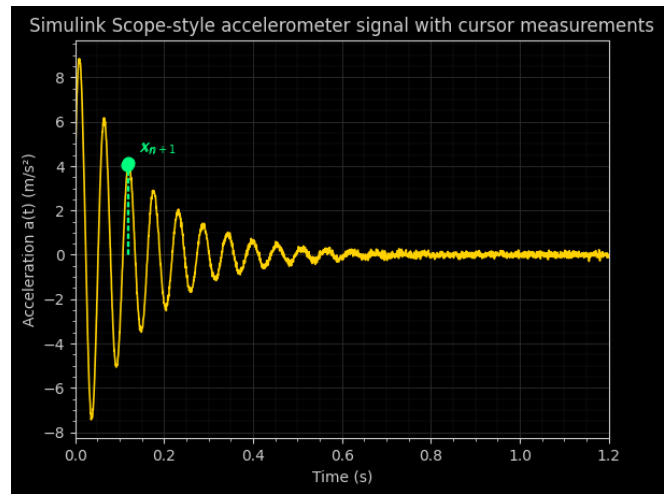


Рис. 2 – Обробка сигналу з акселерометра

Система автоматизованого контроль (САУ) для фільтрації шумів з акселерометру при вимірюванні коливань тестового зразка, складеться з наступних блоків, рис. 3:

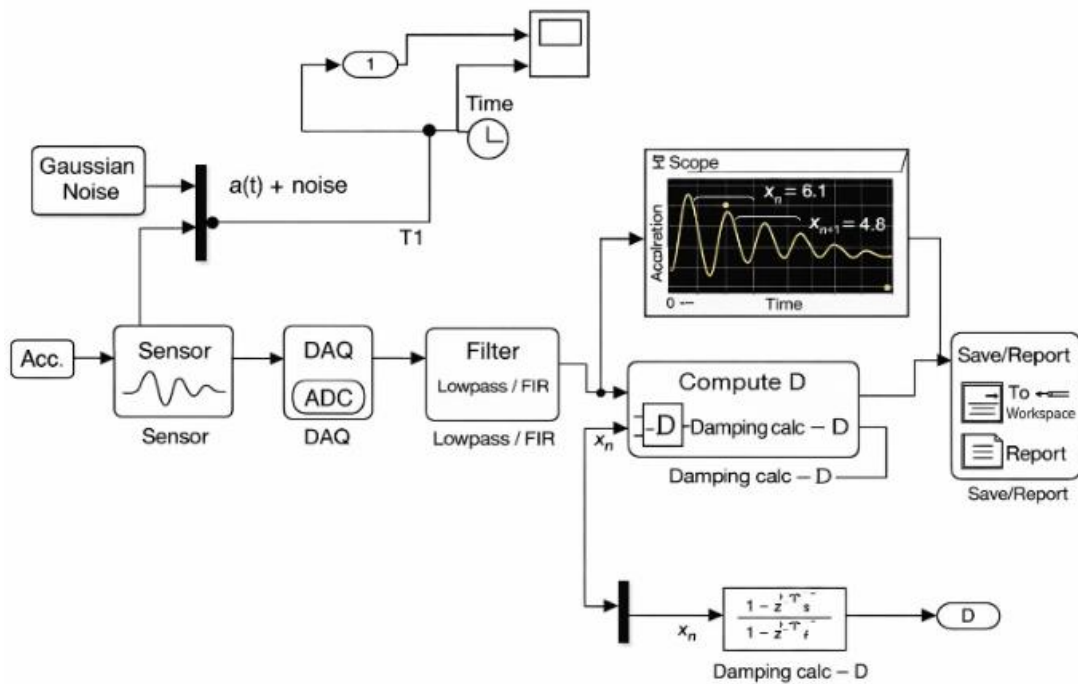


Рис. 3 – Обробка сигналу з акселерометра

Розроблена система автоматизованого контролю забезпечує придушення зовнішніх шумів та виділення інформативної складової сигналу акселерометра, що відповідає вільним затухаючим коливанням після ударного збудження.

На вході системи формується сигнал прискорення  $a(t)$ , до якого додається зовнішній шум (вимірювальний, механічний та електронний), змодельований як адитивний випадковий процес. Отриманий сигнал  $a(t)+n(t)$  надходить на вхід вимірювального тракту.

Загальну передавальну функцію каналу обробки сигналу акселерометра можна подати у вигляді:

$$W_{(s)} = W_s(s) \cdot W_{DAQ}(s) \cdot W_f(s), \tag{3}$$

Де:  $W_s(s)$  – передавальна функція акселерометра,  $W_{DAQ}(s)$  – передавальна функція вимірювального тракту,  $W_f(s)$  – передавальна функція фільтра.

Передавальна функція акселерометра у першому наближенні може бути представлений як аперіодична ланка першого порядку:

$$W_s(s) = \frac{K_s}{T_s s + 1} \quad (4)$$

Де:  $K_s$  – коефіцієнт чутливості акселерометра,  $T_s$  – стала часу.

Передавальна функція фільтра для пригнічення шумів у системі використовується низькочастотний фільтр, який у безперервному вигляді можна подати як:

$$W_f(s) = \frac{1}{T_f s + 1} \quad (5)$$

Де:  $T_f$  – стала часу фільтра, що визначає граничну частоту зрізу.

Загальна передавальна функція з урахуванням наведених ланок загальна передавальна функція каналу фільтрації має вигляд:

$$W(s) = \frac{K_s}{(T_s s + 1)(T_f s + 1)} \quad (6)$$

Дана передавальна функція забезпечує згладжування шумових складових сигналу прискорення акселерометра та збереження основної низькочастотної динаміки, необхідної для коректного визначення параметрів затухання коливань тестового зразка.

Для кожної комбінації параметрів дослідження вимірювання проводилися не менше трьох разів, після чого обчислювалося середнє значення відсотка гасіння вібрацій, що дозволяло зменшити вплив випадкових похибок та підвищити достовірність результатів.

Змінюючи вагу та висоту удару молоту, можливо змінювати навантаження на тестовий зразок, тим самим відварювати необхідні параметри вібрації, які виникають при житті діяльності людини та враховуючи її фізіологічні особливості (такі як вага людини, зріст, розмір ступні, і.т.д.).

#### Проведення досліджень.

Для проведення експериментальних досліджень демпфувальних властивостей були виготовлені тестові зразки амортизувальних вкладишів, призначені для застосування у ножних протезах. Зразки виготовлялися з термопластичного поліуретану (TPU) із використанням технології адитивного FFF/FDM 3D-друку, що забезпечує відтворюваність геометрії та можливість керування внутрішньою структурою виробів.

У дослідженні використовувався TPU з різними значеннями твердості за шкалою Шора А, а саме:

- 50А, еластомер з підвищеною твердістю, що відзначається меншою деформівністю та зниженими внутрішніми втратами енергії;
- 80А, еластомер середньої твердості з компромісним співвідношенням жорсткості та демпфувальних властивостей;
- 90А, еластомер з низькою твердістю, що характеризується підвищеною деформівністю та значними в'язкопружними втратами енергії.

Для зручності проведення експерименту зразки різної твердості будуть надруковані різним кліром рис. 4:



а) – зразок з твердістю 50А; б – зразок з твердістю 80А; в – зразок з твердістю 90А

Рис. 4 – Приклади зразків з різного матеріалу

Вибір зазначених рівнів твердості зумовлений необхідністю комплексного дослідження впливу механічних властивостей матеріалу на ефективність гасіння вібрацій амортизувальними вкладишами, виготовленими методом адитивного 3D-друку. Зміна твердості TPU безпосередньо впливає на його в'язкопружні характеристики, зокрема на здатність матеріалу до деформації, поглинання та розсіювання механічної енергії. Саме тому використання матеріалів з різними значеннями Shore A дозволяє оцінити межі зміни демпфувальних властивостей та визначити оптимальні умови їх застосування в конструкціях протезних систем.

Для керування демпфувальними властивостями досліджуваних зразків у їх внутрішній структурі застосовувалася перфорація, виконана у вигляді регулярної решітки. Такий підхід дозволяє змінювати ефективну жорсткість конструкції та характер деформацій без зміни хімічного складу матеріалу. У дослідженні розглядалися основні параметри перфорації, а саме:

- форма отворів у внутрішній структурі амортизувального вкладиша (трикутна, ромбічна та шестикутна);
- ступінь перфорації за площею (40%, 60% та 80%).

Форма отворів у внутрішній структурі амортизувального вкладиша суттєво впливає на характер локальних деформацій матеріалу та розподіл напружень у зоні контакту. Це, у свою чергу, визначає механізм розсіювання енергії та ефективність гасіння вібрацій при динамічному навантаженні.

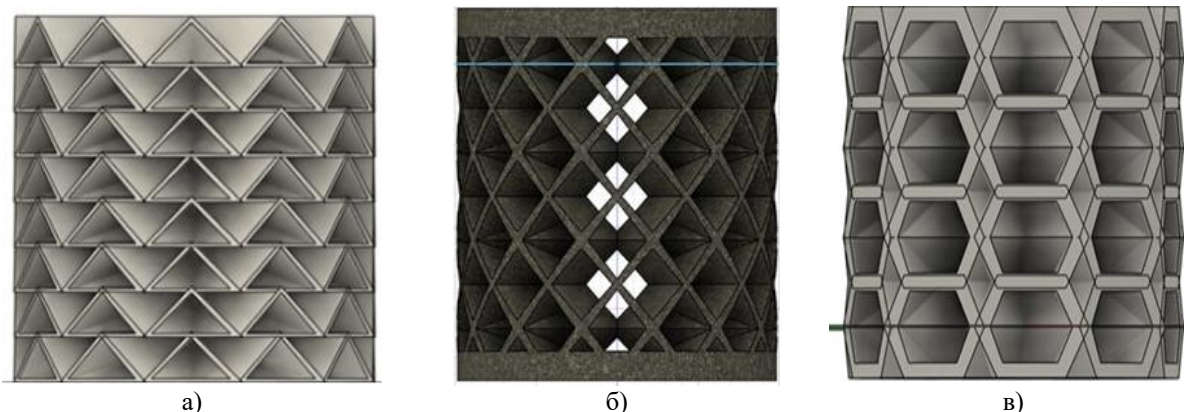
Трикутна перфорація характеризується наявністю гострих вершин, у яких відбувається локальна концентрація напружень. Такі зони є джерелами нерівномірного деформаційного поля, що обмежує розвиток об'ємних і зсувних деформацій у матеріалі. У результаті частина механічної енергії не переходить у в'язкопружні втрати, а повертається у систему, що призводить до зниження ефективності демпфування, особливо для матеріалів із підвищеною жорсткістю.

Ромбічна перфорація забезпечує більш збалансований розподіл напружень порівняно з трикутною формою. Завдяки більш симетричній геометрії та менш вираженим концентраторам напружень ромбічні отвори сприяють рівномірнішій деформації структури. Це забезпечує стабільніші умови розсіювання енергії та, відповідно, середні значення гасіння вібрацій у всьому діапазоні досліджуваних параметрів.

Шестикутна перфорація формує квазіізотропну внутрішню структуру, близьку за поведінкою до стільникових матеріалів. Така геометрія забезпечує рівномірний розподіл деформацій у різних напрямках і сприяє ефективному поглинанню механічної енергії за рахунок розвитку зсувних деформацій та внутрішніх втрат. У результаті шестикутна структура демонструє найвищі показники гасіння вібрацій серед досліджених варіантів.

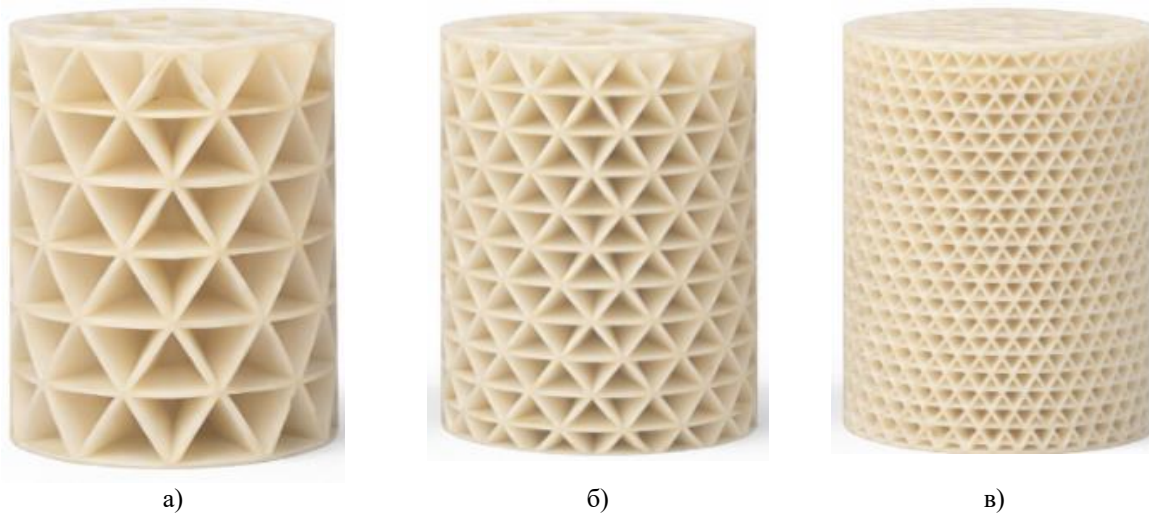
Ступінь перфорації визначає співвідношення між жорсткістю та деформаційною податливістю структури. При збільшенні перфорації зростає здатність матеріалу до деформації та розсіювання енергії, однак надмірне зменшення суцільної частини призводить до ослаблення конструкції та зниження ефективності передачі енергії у демпфувальні механізми. Це обумовлює наявність оптимального діапазону перфорації для кожного типу матеріалу.

У цілому, форма отворів відіграє коригуючу роль у формуванні демпфувальних властивостей амортизувального вкладиша, тоді як визначальними факторами залишаються жорсткість матеріалу та ступінь перфорації. Отримані закономірності підтверджуються експериментальними результатами, наведеними на рис. 5, що демонструють комплексний вплив конструктивних і матеріальних параметрів на ефективність гасіння вібрацій.



а – трикутна перфорація; б – ромбічна перфорація; в – шестикутна перфорація  
Рис. 5 – Моделі тестових зразків

Ступінь перфорації визначався як відношення площі отворів до загальної площі поперечного перерізу зразка, рис. 6. Зміна форми та відсотка перфорації дозволяла варіювати ефективну жорсткість і внутрішні втрати енергії матеріалу без зміни зовнішніх розмірів виробу.



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

Рис. 6 – 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.

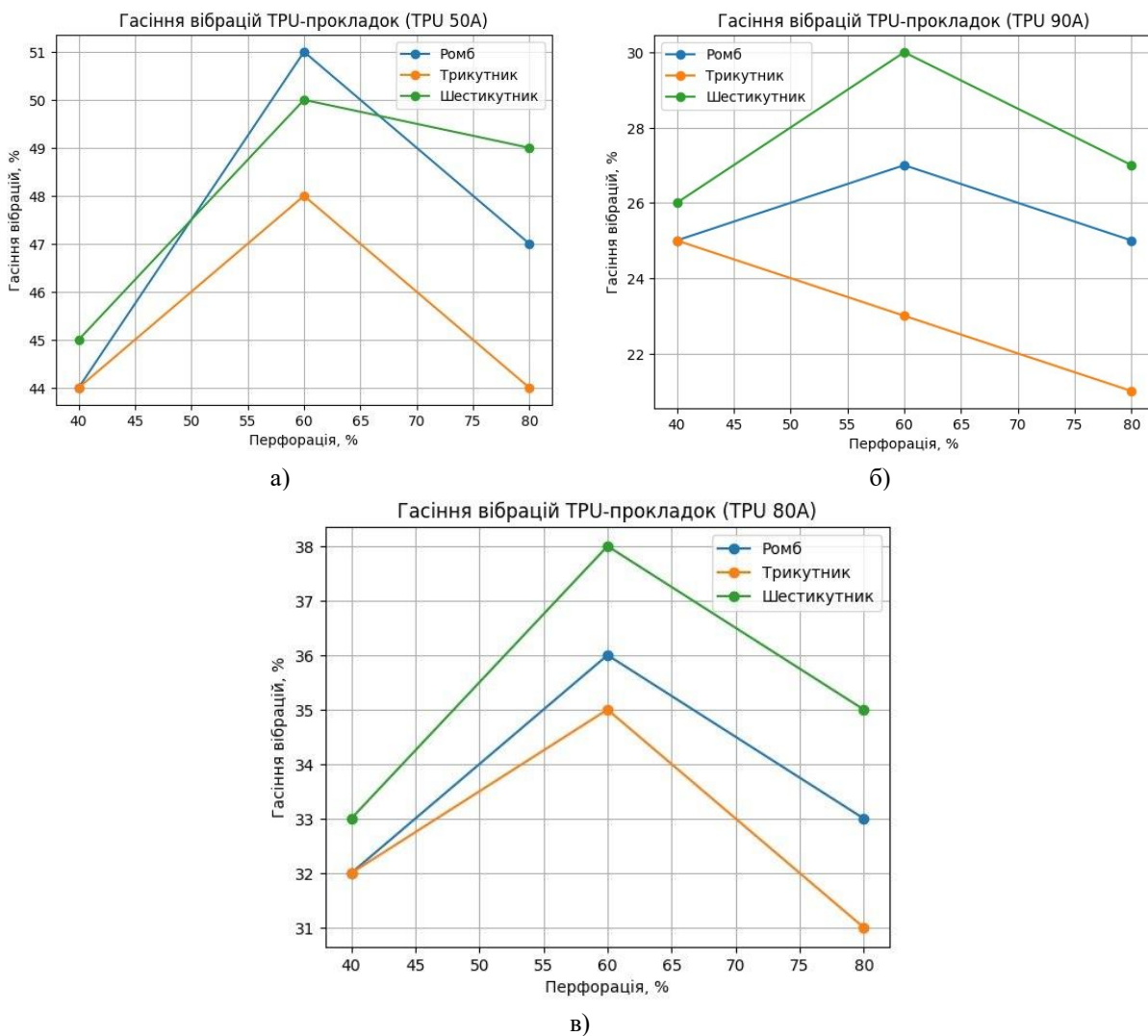
Виходячи з кількості параметрів та варіацій їх значень було виготовлено та досліджено 27 тестових зразків з різним відсотком перфорації форми отворів та твердістю матеріалів, таблиця 1.

Таблиця 1 – Результати вимірювань

№	Жорсткість TPU	Форма перфорації	Перфорація, %	Гасіння вібрацій, %
1	50А	Ромб	40	44
2	50А	Ромб	60	51
3	50А	Ромб	80	47
4	50А	Трикутник	40	44
5	50А	Трикутник	60	48
6	50А	Трикутник	80	44
7	50А	Шестикутник	40	45
8	50А	Шестикутник	60	50
9	50А	Шестикутник	80	49
10	80А	Ромб	40	32
11	80А	Ромб	60	36
12	80А	Ромб	80	33
13	80А	Трикутник	40	32
14	80А	Трикутник	60	35
15	80А	Трикутник	80	31
16	80А	Шестикутник	40	33
17	80А	Шестикутник	60	38
18	80А	Шестикутник	80	35
19	90А	Ромб	40	25
20	90А	Ромб	60	27
21	90А	Ромб	80	25
22	90А	Трикутник	40	25
23	90А	Трикутник	60	23
24	90А	Трикутник	80	21
25	90А	Шестикутник	40	26
26	90А	Шестикутник	60	30
27	90А	Шестикутник	80	27

Аналіз експериментальних даних, наведених у табл. та представлених графічно на рис. 7, 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 – гасіння вібрації TPU прокладки (50A); б – гасіння вібрації TPU прокладки (80A); в – гасіння вібрації TPU прокладки (90A)

Рис. 7 – Результати дослідження

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.

### Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів, зокрема фінансового, особистого, авторського чи будь-якого іншого характеру, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, опубліковані в цій статті.

### Фінансування

Фінансування було надано в рамках реалізації державної теми «Мобільна польова лабораторія для оперативного відновлення та виробництва компонентів військової техніки» на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та техніки безпеки (КІТАРБІ) Харківського національного університету радіоелектроніки.

### Висновки.

У роботі досліджено демпфувальні властивості амортизувальних вкладишів з TPU, виготовлених за технологією 3D-друку, з різними значеннями жорсткості та параметрами внутрішньої перфорації. Аналіз експериментальних даних показав, що ефективність гасіння вібрацій має нелінійну залежність від ступеня перфорації, для якої характерна наявність оптимального діапазону. У цьому діапазоні досягається баланс між зменшенням ефективної жорсткості конструкції та зростанням внутрішніх в'язкопружних втрат, що забезпечує максимальне розсіювання коливальної енергії.

Встановлено, що жорсткість матеріалу TPU є визначальним чинником формування демпфувальних властивостей. М'які еластомери характеризуються підвищеною здатністю до гасіння вібрацій завдяки інтенсивним деформаційним процесам і гістерезисним втратам, тоді як зі зростанням жорсткості матеріалу ефективність демпфування зменшується. Форма перфорації впливає на гасіння вібрацій меншою мірою та виконує коригуючу функцію, забезпечуючи незначні відмінності за рахунок особливостей розподілу напружень у матеріалі.

Отримані результати підтверджують доцільність комплексної оптимізації матеріальних і геометричних параметрів амортизувальних вкладишів. Запропонований підхід може бути використаний при проектуванні та вдосконаленні демпфувальних елементів ножних протезів, виготовлених методами адитивного виробництва, з метою підвищення комфорту та зниження вібраційних навантажень під час експлуатації.

Автори висловлюють подяку за всебічну підтримку доктору технічних наук, професору Ігорю Шакировичу Невлюдову –Заслуженому діячу науки і техніки України, Лауреату Державної премії в галузі науки і техніки України; Лауреату Державної премії України в галузі освіти, завідувачу кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, ХНУРЕ; колективу Студентського конструкторсько-технологічного бюро «Робототехніка та мехатроніка» кафедри КІТАРБІ, ХНУРЕ.

### Список літератури:

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. Wang, Y., Tan, Q., Pu, F., Boone, D.A. and Zhang, M. (2020) "A review of the application of additive manufacturing in prosthetic and orthotic clinics from a biomechanical perspective", *Engineering*, 6 (11), P. 1258–1266. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.07.019>
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. 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>
5. Baldock, M., Pickard, N., Prince, M., Kirkwood, S., Chadwell, A., Howard, D., Dickinson, A., Kenney, L., Gill, N. and Curtin, S. (2023) "Adjustable prosthetic sockets: A systematic review of industrial and research design characteristics and their justifications", *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 20, 147. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12984-023-01270-0>
6. A Small-Sized Robot Prototype Development Using 3D Printing / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, S. Maksymova, O. Chala // *CAD In Machinery Design Implementation and Educational Issues (CADMD'2023)* : proceedings of the XXXI International Conference. (Conference in memory of Professor Jerry Wrobel), Suprasl, 26-28 October, 2023. – Suprasl, 2023. – P. 12.
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. 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>
9. 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>

10. 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>

11. Gritsyuk, V., Nevliudov, I., Zablodskiy, M. and Subramanian, P. (2022) "Estimation of eddy currents and power losses in the rotor of a screw electrothermomechanical converter for additive manufacturing", Machinery and Energetics, 13(2), pp. 41–49. DOI: [https://doi.org/10.31548/machenergy.13\(2\).2022.41-49](https://doi.org/10.31548/machenergy.13(2).2022.41-49)

#### References (transliterated)

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. Wang, Y., Tan, Q., Pu, F., Boone, D.A. and Zhang, M. (2020) "A review of the application of additive manufacturing in prosthetic and orthotic clinics from a biomechanical perspective", Engineering, 6 (11), P. 1258–1266. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.07.019>

3. Nikitin, D. O., Nevlyudov, I. Sh., Zharikova, I. V., Bronnikov, A. I., & Strilets, R. E. (2025). Development of a method for controlling products during photopolymer 3D printing. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(1 (136)), 42–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335706>

4. 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>

5. Baldock, M., Pickard, N., Prince, M., Kirkwood, S., Chadwell, A., Howard, D., Dickinson, A., Kenney, L., Gill, N. and Curtin, S. (2023) "Adjustable prosthetic sockets: A systematic review of industrial and research design characteristics and their justifications", Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 20, 147. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12984-023-01270-0>

6. A Small-Sized Robot Prototype Development Using 3D Printing / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, S. Maksymova, O. Chala // CAD In Machinery Design Implementation and Educational Issues (CADMD'2023) : proceedings of the XXXI International Conference. (Conference in memory of Professor Jerry Wrobel), Suprasl, 26-28 October, 2023. – Suprasl, 2023. – P. 12.

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. 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>

9. 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>

10. 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>

11. Gritsyuk, V., Nevliudov, I., Zablodskiy, M. and Subramanian, P. (2022) "Estimation of eddy currents and power losses in the rotor of a screw electrothermomechanical converter for additive manufacturing", Machinery and Energetics, 13(2), pp. 41–49. DOI: [https://doi.org/10.31548/machenergy.13\(2\).2022.41-49](https://doi.org/10.31548/machenergy.13(2).2022.41-49)

*Надійшла (received) 21.01.2026*

#### *Відомості про авторів / About the Authors/*

**Богдан Місан (Misan Bohdan)** – здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за освітньо-науковою програмою «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТдф) кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР) Харківський національний університет радіоелектроніки (ХНУРЕ) м. Харків, Україна; e-mail: [bohdan.misan@nure.ua](mailto:bohdan.misan@nure.ua); ORCID AI: <https://orcid.org/0009-0007-4905-9280>.

Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=60566381800>.

**Дмитро Нікітін (Nikitin Dmytro)** – кандидат технічних наук, доктор філософії (PhD), доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР) Харківський національний університет радіоелектроніки (ХНУРЕ), м. Харків, Україна; e-mail: [dmytro.nikitin@nure.ua](mailto:dmytro.nikitin@nure.ua); ORCID AI: <https://orcid.org/0000-0002-5591-4438>;

Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59412787100>.