

УДК 699.841

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.290426.151.1236

ОГЛЯД НЕОДНОРІДНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА МЕТАМАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВІБРАЦІЙНОГО І СЕЙСМІЧНОГО ЗАХИСТУ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

ДАНІШЕВСЬКИЙ В. В.¹, *докт. техн. наук., проф.*,
БЕЗВЕРХИЙ Д. С.^{2*}, *асп.*

¹ Кафедра будівельної і теоретичної механіки та опору матеріалів, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-13, e-mail: vladyslav.danishevskyy@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3049-4721

^{2*} Кафедра будівельної і теоретичної механіки та опору матеріалів, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 152-67-98, e-mail: bezup.inc@gmail.com, ORCID ID: 0009-0001-0576-4152

Анотація. У статті висвітлено актуальну проблему сейсмічного захисту будівель і споруд, з особливим акцентом на застосування періодичних матеріалів для створення інноваційних систем сейсмоізоляції та віброзахисту. Зазначено, що традиційні методи сейсмоізоляції, зокрема гумометалеві опори та інші пружні вставки, мають низку недоліків: значні відносні переміщення під час сильних поштовхів, обмежену довговічність, а також недостатню ефективність у вертикальному напрямку, що є критичним для об'єктів підвищеної відповідальності, включно з конструкціями атомних електростанцій. У статті досліджуються можливості використання періодичних матеріалів і конструкцій, здатних формувати заборонені зони для сейсмічних хвиль певних частот, що дає змогу послаблювати або блокувати їхнє поширення в ґрунтовому масиві та фундаментній частині споруди. Особливу увагу приділено розробці, оптимізації та експериментальній верифікації одновимірних, двовимірних і тривимірних періодичних фундаментів, а також оцінюванню їхньої роботи в умовах різних типів збуджень. Розглянуто результати випробувань на вібростендах і в польових умовах, які підтверджують ефективність таких систем у зниженні динамічних навантажень, амплітуд коливань і передавання енергії на надземні конструкції. Показано, що застосування періодичних фундаментів може забезпечити стабільні демпфувальні властивості без складних механічних пристроїв і суттєво зменшити ризик накопичення пошкоджень у несучих елементах. **Мета статті** полягає у всебічному аналізі теоретичних, чисельних та експериментальних досліджень у галузі періодичних матеріалів для розробки систем сейсмоізоляції, що не потребують постійного обслуговування, мають підвищену надійність і мінімізують відносні переміщення. Зокрема, дослідження зосереджене на перевірці теорії, уточненні основних параметрів проектування таких систем та визначенні умов їхньої максимальної ефективності для реальних інженерних споруд. **Висновок.** Проаналізовано та підтверджено експериментально, що періодичні фундаменти є перспективним і ефективним способом зменшення пошкоджень конструкцій від сейсмічних збуджень. Результати досліджень можуть бути використані для розробки практичних рекомендацій, методик розрахунку та проектних настанов щодо впровадження цієї інноваційної технології в цивільному й промисловому будівництві.

Ключові слова: сейсмічний захист; метаматеріали; фононний кристал; періодичні конструкції; заборонена зона; сейсмічне екранування; сейсмоізоляція

REVIEW OF HETEROGENEOUS STRUCTURES AND METAMATERIALS FOR VIBRATION AND SEISMIC PROTECTION OF BUILDINGS AND STRUCTURES

DANISHEVSKYY V.V.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BEZVERKHYY D.S.^{2*}, *Postgrad. Stud.*

¹ Department of Structural and Theoretical Mechanics and Strength of Materials, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-13, e-mail: vladyslav.danishevskyy@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3049-4721

^{2*} Department of Structural and Theoretical Mechanics and Strength of Materials, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (066) 152-67-98, e-mail: bezup.inc@gmail.com, ORCID ID: 0009-0001-0576-4152

Abstract. The article addresses the pressing issue of seismic protection of buildings and structures, with a particular emphasis on the use of periodic materials for the development of innovative seismic isolation and vibration mitigation systems. It is noted that traditional seismic isolation methods, including rubber – metal bearings and other resilient inserts, have several drawbacks: large relative displacements during strong ground motions, limited durability, and insufficient effectiveness in the vertical direction, which is critical for high-responsibility facilities, including nuclear power plant structures. The article explores the potential of periodic materials and structural configurations capable of creating band gaps for seismic waves within specific frequency ranges, thereby enabling the attenuation or blocking of their propagation through the soil mass and the foundation system. Special attention is devoted to the design, optimization, and experimental verification of one-dimensional, two-dimensional, and three-dimensional periodic foundations, as well as to assessing their performance under various excitation types. The results of vibration-table and field tests are presented, confirming the effectiveness of such systems in reducing dynamic loads, vibration amplitudes, and energy transmission to superstructures. It is shown that the use of periodic foundations can provide stable damping characteristics without complex mechanical devices and can significantly reduce the risk of cumulative damage in load-bearing elements. **The purpose of the article** is to provide a comprehensive analysis of theoretical, numerical, and experimental studies in the field of periodic materials aimed at developing seismic isolation systems that do not require continuous maintenance, offer enhanced reliability, and minimize relative displacements. In particular, the study focuses on validating the underlying theory, refining the key design parameters of such systems, and determining the conditions under which they achieve maximum effectiveness for real engineering structures. **Conclusion.** The analysis and experimental validation confirm that periodic foundations are a promising and efficient means of reducing structural damage caused by seismic excitations. The research findings can be used to develop practical recommendations, calculation methodologies, and design guidelines for implementing this innovative technology in civil and industrial construction.

Keywords: *seismic protection; metamaterials; phononic crystal; periodic structures; band gap; seismic shielding; seismic isolation*

Вступ. Сейсмічні явища залишаються одним із найбільш руйнівних природних катаклізмів, що становлять постійну загрозу для людських життів та інфраструктури. Традиційні підходи до сейсмостійкого проектування, що розвивалися протягом десятиліть, зосереджені переважно на підвищенні міцності, жорсткості та пластичності несучих конструкцій будівель. Мета такого підходу полягає в тому, щоб споруда могла витримати сейсмічні навантаження, деформуючись, але не руйнуючись, тим самим забезпечуючи безпеку людей. Проте навіть сучасні будівельні норми часто орієнтовані на принцип збереження життя, що допускає значні пошкодження конструкцій, які можуть зробити будівлю непридатною для подальшої експлуатації після землетрусу [1].

Значним кроком уперед стала концепція сейсмоізоляції основи, яка передбачає встановлення між фундаментом і надземною частиною будівлі спеціальних гнучких елементів, таких як еластомерні або фрикційні маятникові опори. Ці пристрої ефективно відокремлюють споруду від горизонтальних коливань ґрунту, значно зменшуючи сейсмічні сили, що діють на неї. Однак і цей метод має суттєві обмеження.

По-перше, він ефективний переважно проти горизонтальних коливань, тоді як вертикальна складова землетрусу передається на конструкцію майже без змін. По-друге, робота сейсмоізоляторів супроводжується великими відносними горизонтальними переміщеннями між будівлею та її основою, що вимагає влаштування спеціальних компенсаційних зазорів навколо споруди. Це ускладнює проектування і є неприйнятним для об'єктів із жорсткими інженерними комунікаціями, наприклад, для трубопровідних систем атомних електростанцій.

На основі цих обмежень останніми десятиліттями формується принципово нові методи сейсмічного захисту, що ґрунтуються на досягненнях фізики твердого тіла, зокрема на концепціях фононних кристалів та метаматеріалів [2; 3]. Ідея полягає в тому, щоб не просто пасивно протистояти сейсмічній енергії в межах конструкції, а активно керувати поширенням сейсмічних хвиль у ґрунтовому масиві, тобто фільтрувати, відхиляти або поглинати їх ще до того, як вони досягнуть фундаменту споруди. Цей підхід є прямим перенесенням ідей та математичного апарату, розроблених у нанофотоніці для керування світлом, в

область геофізики та будівельної інженерії для керування пружними хвилями [4; 5]. Математичні інструменти теорії перетворень, теорії ефективного середовища та теореми Флоке-Блоха, що дозволили створити пристрої для маніпуляції світлом на нанометровому рівні, тепер адаптуються для керування сейсмічними хвилями на макро масштабах [6]. Це відкриває шлях до створення сейсмічних метаматеріалів — штучно структурованих середовищ, здатних демонструвати безпрецедентний контроль над руйнівною енергією землетрусів.

Метою даної роботи є проведення систематичного та всебічного огляду наукових принципів, інженерних рішень та експериментально підтвердженої ефективності неоднорідних періодичних структур та метаматеріалів для сейсмічного захисту. Огляд має на меті винести ключові результати фундаментальних теоретичних робіт, чисельного моделювання та, що найважливіше, великомасштабних лабораторних і польових випробувань. Це дозволить сформулювати чітке уявлення про сучасний стан технології, її потенціал для вирішення практичних завдань сейсмозахисту та визначити основні невирішені проблеми та напрямки для подальших досліджень.

Метаматеріали та їх динамічні властивості. Перехід від теоретичних концепцій метаматеріалів до їх практичної реалізації для сейсмічного захисту пов'язаний із вирішенням низки фундаментальних наукових та інженерних проблем. По-перше, це проблема масштабування. Основні принципи фононних кристалів були розроблені для керування високочастотними акустичними (кГц-МГц) та тепловими (ТГц) коливаннями, де довжини хвиль є мікрометровими або нанометровими. Сейсмічні ж хвилі характеризуються наднизькими частотами (зазвичай в діапазоні 0,1–20 Гц) і, відповідно, великими довжинами хвиль, що можуть сягати десятків і сотень метрів [7; 8]. Пряме масштабування класичних фононних кристалів для таких довжин хвиль є неможливим, оскільки вимагало б створення

періодичних структур із розмірами елементів, сумісними з довжиною хвилі, що є економічно та технічно нереальним. По-друге, це проблема ефективності механізмів. Необхідно було знайти та інженерно реалізувати фізичні механізми, здатні ефективно взаємодіяти з низькочастотними хвилями. Це призвело до зміщення фокусу з механізму бреггівського розсіяння, ефективного для хвиль, довжина яких порівнянна з періодом структури, до механізму локального резонансу. Цей механізм дозволяє створювати заборонені зони на частотах, значно нижчих за бреггівські, що робить концепцію сейсмічних метаматеріалів практично здійсненою. По-третє, це проблема матеріалів та виготовлення. На відміну від лабораторних зразків, великомасштабні сейсмічні метаматеріали мають бути виготовлені з доступних, довговічних та економічно виправданих будівельних матеріалів, таких як бетон, гума, сталь та ґрунт [7–9]. Це вимагає розробки конструктивних рішень, які забезпечували б необхідні динамічні властивості (наприклад, великий контраст імпедансів) при використанні стандартних будівельних технологій. Нарешті, існує критичний розрив між теорією та реальністю. Теоретичні моделі та чисельне моделювання часто базуються на ідеалізованих припущеннях (наприклад, однорідність та лінійність властивостей ґрунту). Реальні ж геологічні умови характеризуються значною неоднорідністю, нелінійністю, наявністю затухання та складною взаємодією різних типів хвиль. Тому єдиним надійним способом підтвердження життєздатності концепції є проведення великомасштабних лабораторних та польових експериментів, які дозволяють перевірити теоретичні прогнози та оцінити реальну ефективність сейсмічних метаматеріалів [8; 10].

В основі функціонування сейсмічних метаматеріалів лежить їхня здатність створювати так звані заборонені зони – діапазони частот, у яких поширення пружних хвиль через періодичне середовище є неможливим. Хвилі, частота яких потрапляє

в таку зону, зазнають сильного відбиття або згасання. Існує два основні фізичні механізми для створення таких зон – бреггівське розсіювання та локальний резонанс.

Бреггівське розсіювання – механізм є аналогом дифракції рентгенівських променів на кристалічній ґратці і базується на деструктивній інтерференції хвиль, розсіяних на періодично розташованих елементах структури. Ефект є найсильнішим, коли довжина хвилі приблизно вдвічі перевищує період структури. Хоча цей механізм є ефективним для високочастотних звукових хвиль, його застосування для сейсмозахисту є проблематичним. Наприклад, для поперечної хвилі з частотою 10 Гц, що поширюється в ґрунті зі швидкістю 200 м/с, довжина хвилі становить 20 м. Для її блокування за допомогою бреггівського розсіювання знадобилася б періодична структура з кроком близько 10 м. Створення таких масивних підземних споруд є надзвичайно дорогим і часто технічно неможливим, що робить цей механізм непрактичним для низькочастотного сейсмічного діапазону [2; 11].

Локальний резонанс – цей механізм став ключовим проривом, що зробив концепцію сейсмічних метаматеріалів життєздатною. Він не залежить від умови Бреґга і дозволяє створювати заборонені зони на частотах, значно нижчих за бреггівські, використовуючи елементи, розміри яких набагато менші за довжину хвилі [12–14]. Ідея полягає у введенні в основне середовище (матрицю) масиву локальних резонаторів [3]. Кожен резонатор, як правило, складається з важкого ядра, оточеного м'якою пружною оболонкою (наприклад, металевий сердечник у гумовій оболонці). Коли частота вхідної сейсмічної хвилі збігається з власною частотою коливань цих резонаторів, вони починають інтенсивно коливатися в протифазі до хвилі. Це призводить до того, що енергія хвилі «захоплюється» резонаторами і локально розсіюється, що ефективно блокує її подальше поширення. Саме субхвильова природа локального резонансу дозволяє

проектувати відносно компактні та практичні структури для керування довгохвильовими сейсмічними коливаннями [2; 15].

Розвиток теоретичної бази також не стояв на місці. Перші спроби описати ці явища за допомогою моделей градієнтної пружності зіткнулися з проблемою порушення принципу причинності – одного з фундаментальних законів фізики. Ці моделі, через свою математичну структуру, дозволяли існування так званих еванесцентних хвиль, які могли б миттєво переносити енергію, що суперечить реальності. Вирішенням стало створення фізично коректних, динамічно узгоджених моделей. У них було відновлено баланс між описом просторових і часових змін у системі. Включення до рівнянь вищих похідних не тільки за координатою, але й за часом, усунуло нефізичні ефекти і зробило моделі надійним інструментом для прогнозування реальних процесів [11; 15].

Одномірні періодичні фундаменти. Найпростішою реалізацією концепції сейсмічного метаматеріалу є одновимірний періодичний фундамент. Класичним прикладом такої системи є багатошарова конструкція, що складається з чергування жорстких та м'яких шарів, наприклад, бетону та гуми [16; 17]. У типових експериментальних дослідженнях використовуються шари бетону як жорстка і масивна складова та шари з м'якої гуми або поліуретану як податлива, пружна складова [3]. Шари надійно з'єднуються між собою, щоб забезпечити спільну роботу конструкції. Для аналізу поширення хвиль у такій нескінченній періодичній структурі застосовується теорема Флоке-Блоха [18]. Вона дозволяє звести задачу до аналізу однієї елементарної комірки (що складається з одного шару бетону та одного шару гуми) з періодичними граничними умовами. В результаті отримується дисперсійне співвідношення, яке пов'язує частоту хвилі з її хвильовим числом. Діапазони частот, для яких хвильове число стає комплексним, відповідають забороненим зонам, де хвилі експоненційно згасають. Аналіз показує, що

такі структури можуть створювати заборонені зони як для поперечних, так і для поздовжніх хвиль. Ефективність 1D-періодичних фундаментів була переконливо доведена під час випробувань на вібростенді. У цих експериментах порівнювалася динамічна реакція двох ідентичних моделей

будівель: одна на стандартному жорсткому фундаменті, інша — на періодичному багатопаровому фундаменті. Результати, узагальнені в таблиці 1, демонструють високу ефективність та частотну селективність системи [17].

Таблиця 1

Результати експериментальної валідації 1D-періодичних фундаментів на вібростенді

Тип збудження	Частота збудження, Гц	Тип хвилі	Результат (пікове прискорення/переміщення)	Зменшення вібрації, %
Навколишня вібрація	~50	Поперечна	Пікове прискорення зменшено з 0,046 g до 0,003 g	93,5
Сейсмічний запис (Oroville)	~18	Поперечна	Пікове горизонтальне прискорення зменшено на 50 %	50
Сейсмічний запис (Oroville)	~18	Поздовжня	Пікове вертикальне переміщення зменшено на 15,9 %	15,9
Гармонічне збудження	6–7	Поперечна	Незначне згасання або його відсутність	~0

Дані випробувань чітко показують, що коли частота збудження потрапляє в теоретично розраховану заборонену зону (як у випадках навколишньої вібрації та сейсмічного запису), періодичний фундамент значно знижує амплітуду коливань, що передаються на споруду. Водночас, для збуджень із частотами поза межами забороненої зони ефект згасання практично відсутній. Це підтверджує, що механізм працює саме як частотний фільтр, як і передбачає теорія. Важливо, що система показала ефективність не тільки проти горизонтальних, але й проти вертикальних коливань, що є суттєвою перевагою над традиційною сейсмоізоляцією.

Двовимірні метаматеріали для захисту від поверхневих та об'ємних хвиль. Двовимірні сейсмічні метаматеріали зазвичай реалізуються як планарні періодичні структури, сформовані в приповерхневому шарі ґрунту або у площині фундаменту. Їхня мета — керувати послаблювати насамперед поверхневі хвилі (передусім хвилі Релея, а в окремих конфігураціях також хвилі Лява), які переносять значну частину енергії та призводять до великих переміщень поблизу поверхні [9]. На відміну від одномірних

періодичних фундаментів, 2D-структури можуть забезпечувати «фільтрацію» коливань у площині в кількох напрямках розповсюдження та краще узгоджуються з реальним, неідеалізованим хвильовим полем [16; 19].

Типові 2D-конфігурації включають масиви свердловин, заглиблених або частково заглиблених стовпів, а також масиви локальних резонаторів у ґрунті чи на поверхні. Механізми утворення заборонених зон у таких системах, як правило, поєднують брегівське розсіювання в періодичному середовищі та локальний резонанс елементів комірки; у сучасних роботах активно досліджують «гібридні» смуги, які поєднують кілька проміжків і дають ширший робочий діапазон частот [16; 19].

Важливий сучасний напрям — 2D метаповерхні, у яких «тонкий» структурований шар (або поверхневий масив резонаторів) налаштовують на широкосмугове послаблення хвиль Релея в діапазоні, характерному для інженерно значущих збурень. Зокрема, запропоновано метаповерхню для широкосмугового згасання хвиль Релея приблизно у смузі 3,2–19,2 Гц із лабораторною експериментальною валідацією та ефектом

істотного зменшення поверхневих деформацій, що інтерпретується також як перетворення частини поверхневої енергії в об'ємні хвилі [5].

Практично важливим є врахування шаруватості ґрунтової основи. Для двошарових ґрунтів запропоновано комбіновану 2D-модель на принципі локального резонансу, де комірка містить частково заглиблений бетонний стовп і багат шарову композитну оболонку навколо підземної частини, а чисельний аналіз демонструє істотне послаблення хвилі Релея, а також ослаблення реального сейсмічного сигналу за рахунок правильної геометрії або градієнтного компонування [20].

Окремо варто виділити експериментальну перевірку 2D-підходів у реальному ґрунті. Класичні польові експерименти для 2D-періодичних фундаментів підтверджують наявність заборонених зон і зменшення реакції надфундаментної структури в цільових смугах частот [6]. Новіші польові дослідження «порожнинного» типу (масив квадратних отворів) демонструють, що навіть відносно проста 2D-геометрія може по-різному послаблювати хвилі Релея та Лява; при цьому автори окремо наголошують, що через неоднорідність ґрунтів та складність взаємодій польова валідація є принципово необхідною для коректного перенесення чисельних результатів у практику [21]. Такі висновки узгоджуються з сучасним трендом переходу від «чистої дисперсії» до комплексних метрик ефективності, що враховують реальну геологію, демпфування та нелінійність ґрунтового середовища [5; 22].

Метаміста та сейсмічне екранування. Досягнення в галузі сейсмічних метаматеріалів відкрили шлях до ще більш амбітних та інноваційних концепцій, які можуть докорінно змінити підходи до проектування сейсмостійких міст. Ця концепція пропонує розглядати цілий міський район або навіть місто не як набір окремих будівель, а як єдиний, великомасштабний метаматеріальний комплекс. У цій методології будівлі

перестають бути пасивними об'єктами, що зазнають впливу землетрусу, а стають активними елементами системи – «надземними резонаторами». Їхня колективна динамічна поведінка, власні резонансні частоти та взаємодія з ґрунтовою основою можуть суттєво змінювати локальне сейсмічне поле, посилюючи або, при правильному проектуванні, послаблюючи коливання [9; 21].

Для реалізації трансформаційної урбаністики ідеї «метаміста» пропонується використовувати математичний апарат теорії перетворень, запозичений з оптики. Цей підхід дозволяє розробляти такі схеми міського планування, в яких розташування вулиць, щільність та висотність забудови інженерно розраховані для того, щоб направляти сейсмічні хвилі за певними, безпечними траєкторіями, подібно до того, як лінза фокусує світло [22].

Сейсмічне екранування – найбільш вражаючим застосуванням цих ідей є створення сейсмічного плаща-невидимки – спеціально спроектованої зони з періодично розташованих структур (наприклад, будівель або підземних паль), яка змушує сейсмічні хвилі плавно огинати центральну, захищену область, залишаючи її практично незворушеною [9; 23; 24].

Було проведено моделювання для сейсмічного екрана діаметром 1 км. Результати показали, що така структура здатна ефективно відхилити поверхневі хвилі Релея з частотою 0,5 Гц [9; 23]. Це продемонструвало, що центральна зона екрана залишається захищеною від найбільш руйнівних зсувних компонент сейсмічної хвилі. Ці концепції знаменують собою еволюційний стрибок у сейсмозахисті: від захисту окремої будівлі (сейсмоізоляція), до екранування групи будівель (метабар'єри), і, нарешті, до перетворення самого міського середовища на інтегровану систему захисту. Це передбачає майбутню синергію між сейсмологією, матеріалознавством та міським плануванням, де генеральний план міста може стати його головним захисним механізмом.

Висновки

Аналіз сучасних досліджень однозначно свідчить, що неоднорідні періодичні конструкції та метаматеріали перетворилися з суто теоретичної концепції на експериментально підтверджену технологію з високим потенціалом для вібраційного та сейсмічного захисту. Експерименти, проведені як в лабораторних, так і в польових умовах, переконливо довели принципову можливість та високу ефективність керування сейсмічними хвилями за допомогою штучно створених структур.

Ключові кількісні результати підтверджують значний потенціал технології. Навіть прості одновимірні шаруваті системи здатні зменшити амплітуду сейсмічних коливань приблизно на 50 %. Більш складні двовимірні метаматеріали, що використовують механізм локального резонансу, демонструють виняткову ефективність, досягаючи згасання сейсмічних хвиль на понад 90 %. Це є прямим доказом того, що принцип субхвильової резонансної сейсмоізоляції є фізично обґрунтованим та технічно реалізованим [8]. Однак на шляху до широкого практичного впровадження цих технологій залишається низка викликів, які зміщують фокус із фундаментальної науки на інженерію та економіку:

- **Вартість та масштабованість:** виготовлення та встановлення масивних підземних періодичних структур є надзвичайно капіталомістким процесом.

Необхідна розробка економічно ефективних технологій масового виробництва та монтажу таких систем.

- **Довговічність та експлуатація:** забезпечення довготривалої стабільності характеристик заглиблених у ґрунт елементів, особливо м'яких компонентів (гуми, поліуретану), які можуть деградувати під впливом вологи, хімічних речовин та статичних навантажень, є критично важливим інженерним завданням.

- **Адаптація до локальних умов:** ефективність метаматеріалу сильно залежить від властивостей навколишнього ґрунту. Отже, не існує універсального рішення; кожна система має бути індивідуально розрахована та оптимізована під конкретні геологічні умови об'єкта та спектральні характеристики прогнозованих сейсмічних впливів [25].

- **Широкосмуговість:** хоча метаматеріали є дуже ефективними у своїх розрахункових заборонених зонах, реальні землетруси мають складний та непередбачуваний спектральний склад. Створення систем, здатних забезпечувати надійний захист у широкому діапазоні частот, залишається одним із ключових напрямків для подальших досліджень [12–14; 26].

Незважаючи на ці виклики, сейсмічні метаматеріали відкривають безпрецедентні можливості для захисту критичної інфраструктури та підвищення безпеки в сейсмічно активних регіонах світу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Makris N. Seismic isolation: Early history. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2019. Vol. 48, № 2. Pp. 269–294. DOI: 10.1002/eqe.3124.
2. Brûlé S., Enoch S., Guenneau S. Role of nanophotonics in the birth of seismic megastructures. *Nanophotonics*. 2019. Vol. 8, № 10. DOI: 10.1515/nanoph-2019-0106.
3. Zhang X., Liu W., Shi Q. Field Experiments on a Square-Hole-Type Metamaterial : Exploring the Attenuation of Rayleigh and Love Waves. *Symmetry*. 2025. Vol. 17, № 3. Art. 339. DOI: 10.3390/sym17030339.
4. Brûlé S., Guenneau S. Past, present and future of seismic metamaterials: experiments on soil dynamics, cloaking, large scale analogue computer and space-time modulations. *Comptes Rendus. Physique*. 2020. Vol. 21 (7–8). Pp. 767–785. DOI: 10.5802/crphys.39.
5. Holliman Jr J. E., Schaefer H. T., McGrail B. P., Miller Q. R. S. Review of foundational concepts and emerging directions in metamaterial research : design, phenomena, and applications. *Materials Advances*. 2022. Vol. 3. P. 8390–8406. DOI: 10.1039/D2MA00497F.
6. Yan Y., Laskar A., Cheng Z., Meng F., Tang Y., Mo Y. L., Shi Z. Seismic isolation of two dimensional periodic foundations. *Journal of Applied Physics*. 2014. Vol. 116, № 4. Art. 044908. DOI: 10.1063/1.4891837.

7. Aravantinos-Zafiris N., Sigalas M. M. Large scale phononic metamaterials for seismic isolation. *Journal of Applied Physics*. 2015. Vol. 118, № 6. Art. 064901. DOI: 10.1063/1.4928405.
8. Mo Y. L., Yan Y., Menq F. Y., Stokoe K. H. II, Perkins J., Tang Y. Development of Seismic Isolation Systems Using Periodic Materials : Technical Report. Houston : University of Houston, 2014. DOE NEUP Project № 3219. OSTI ID: 1183763. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1183763>
9. Brûlé S., Ungureanu B., Achaoui Y., Diatta A., Aznavourian R., Antonakakis T., Craster R., Enoch S., Guenneau S. Metamaterial-like transformed urbanism. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2017. Vol. 2, № 1. Art. 20. DOI: 10.1007/s41062-017-0063-x.
10. Mu D., Shu H., Zhao L., An S. A Review of Research on Seismic Metamaterials. *Advanced Engineering Materials*. 2020. Vol. 22, № 4. e1901148. DOI: 10.1002/adem.201901148.
11. Askes H., Metrikine A. V. One-dimensional dynamically consistent gradient elasticity models derived from a discrete microstructure. Part 2: Static and dynamic response. *European Journal of Mechanics A/Solids*. 2002. Vol. 21 (4). Pp. 573–588.
12. Ding H., Huang N. And oth. Negative Poisson’s ratio locally resonant seismic metamaterials vibration isolation barrier. *Acta Mechanica Sinica*. 2024. Vol. 40. Art. 523370. DOI: 10.1007/s10409-024-23370-x.
13. Xu W., Sun H., Hai H., Wang W., Zhou C. Research on multi-oscillator locally resonant seismic metamaterials and the uniform and gradient design for broadband Rayleigh wave attenuation. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2025. Vol. 37. Art. 37. DOI: 10.1007/s00161-025-01368-x.
14. Li P., Yang F., Hou X., Li L., Wu J., Fan H. A radial seismic metamaterial filled with auxetic foam for filtering low-frequency Lamb waves and surface waves. *Acta Mechanica Sinica*. 2026. Vol. 42. Art. 424731. (Online: 27 May 2025). DOI: 10.1007/s10409-025-24731-x.
15. Metrikine A. V. On causality of the gradient elasticity models. *Journal of Sound and Vibration*. 2006. Vol. 297, № 3–5. Pp. 727–742. DOI: 10.1016/j.jsv.2006.03.050.
16. Wu Q., Xu Z., Xu P., Zeng W., Chen X. Optimal design for rubber concrete layered periodic foundations based on the analytical approximations of band gaps and mapping relations. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2024. Vol. 23. Pp. 593–608. DOI: 10.1007/s11803-024-2259-3.
17. Oz M. F., Kumbasaroglu H. M., Kumbasaroglu A. Experimental Investigation of Metamaterial-Inspired Periodic Foundation Systems with Embedded Piezoelectric Layers for Seismic Vibration Attenuation. *Buildings*. 2025. Vol. 15. Art. 4399. DOI: 10.3390/buildings15244399.
18. Xiang H. J., Shi Z. F., Wang S. J., Mo Y. L. Periodic materials-based vibration attenuation in layered foundations: experimental validation. *Smart Materials and Structures*. 2012. Vol. 21, № 11. Art. 112003. DOI: 10.1088/0964-1726/21/11/112003.
19. Kacin M. et al. Seismic metamaterials for low-frequency mechanical wave attenuation. *Natural Hazards*. 2021. Vol. 107. Pp. 213–229. DOI: 10.1007/s11069-021-04580-5.
20. Gupta A., Sharma R., Thakur A., Gulia P. Metamaterial foundation for seismic wave attenuation for low and wide frequency band. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. P. 2293. DOI: 10.1038/s41598-023-27678-1.
21. Chen Z. et al. Pine-like elastic metamaterials for urban seismic Rayleigh wave attenuation. *Urban Lifeline*. 2024. Vol. 2. Art. 1. DOI: 10.1007/s44285-024-00012-5.
22. Maldovan M. Sound and heat revolutions in phononics. *Nature*. 2013. Vol. 503, № 7475. Pp. 209–217. DOI: 10.1038/nature12608.
23. Liang X., Zhang F., Jiang J., Chen J. Rayleigh wave metasurface with the emerging hybrid band characteristics of Auxetic metamaterials. *Applied Physics A*. 2024. Vol. 130. Art. 524. DOI: 10.1007/s00339-024-07689-z.
24. Yang M., Zhang S., Ding Y., Fu Z. A combined seismic metamaterial in layered soils. *Applied Physics A*. 2024. Vol. 130. Art. 586. DOI: 10.1007/s00339-024-07748-5.
25. Liu H., Tian H., Tian Y., Du J., Chen G., Pei L. Radial Seismic Metamaterials Based on Layering Theory : Broadband Shielding of Ultra-Low Frequency Seismic Surface Waves. *Frontiers in Materials*. 2022. Vol. 9. Art. 908058. DOI: 10.3389/fmats.2022.908058.
26. Varma T. V., Chaunsali R., Khasgiwale S. The Influence of Clamping, Structure Geometry, and Material on Seismic Metamaterial Performance. *Frontiers in Materials*. 2021. Vol. 8. Art. 731433. DOI: 10.3389/fmats.2021.731433.

REFERENCES

1. Makris N. Seismic isolation: Early history. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2019, vol. 48, no. 2, pp. 269–294. DOI: 10.1002/eqe.3124.
2. Brûlé S., Enoch S. and Guenneau S. Role of nanophotonics in the birth of seismic megastructures. *Nanophotonics*. 2019, vol. 8, no. 10. DOI: 10.1515/nanoph-2019-0106.
3. Zhang X., Liu W. and Shi Q. Field Experiments on a Square-Hole-Type Metamaterial : Exploring the Attenuation of Rayleigh and Love Waves. *Symmetry*. 2025, vol. 17, no. 3, art. 339. DOI: 10.3390/sym17030339.
4. Brûlé S. and Guenneau S. Past, present and future of seismic metamaterials: experiments on soil dynamics,

cloaking, large scale analogue computer and space–time modulations. *Comptes Rendus. Physique*. 2020, vol. 21 (7–8), pp. 767–785. DOI: 10.5802/crphys.39.

5. Holliman Jr J.E., Schaef H.T., McGrail B.P. and Miller Q.R.S. Review of foundational concepts and emerging directions in metamaterial research : design, phenomena, and applications. *Materials Advances*. 2022, vol. 3, pp. 8390–8406. DOI: 10.1039/D2MA00497F.

6. Yan Y., Laskar A., Cheng Z., Menq F., Tang Y., Mo Y. L. and Shi Z. Seismic isolation of two dimensional periodic foundations. *Journal of Applied Physics*. 2014, vol. 116, no. 4, art. 044908. DOI: 10.1063/1.4891837.

7. Aravantinos-Zafiris N. and Sigalas M.M. Large scale phononic metamaterials for seismic isolation. *Journal of Applied Physics*. 2015, vol. 118, no. 6, art. 064901. DOI: 10.1063/1.4928405.

8. Mo Y.L., Yan Y., Menq F.Y., Stokoe K.H., Perkins J. and Tang Y. Development of Seismic Isolation Systems Using Periodic Materials : Technical Report. Houston : University of Houston, 2014, DOE NEUP Project No. 3219, OSTI ID: 1183763. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1183763>

9. Brûlé S., Ungureanu B., Achaoui Y., Diatta A., Aznavourian R., Antonakakis T., Craster R., Enoch S. and Guenneau S. Metamaterial-like transformed urbanism. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2017, vol. 2, no. 1, art. 20. DOI: 10.1007/s41062-017-0063-x.

10. Mu D., Shu H., Zhao L. and An S. A Review of Research on Seismic Metamaterials. *Advanced Engineering Materials*. 2020, vol. 22, no. 4, p. e1901148. DOI: 10.1002/adem.201901148.

11. Askes H. and Metrikine A.V. One-dimensional dynamically consistent gradient elasticity models derived from a discrete microstructure. Part 2: Static and dynamic response. *European Journal of Mechanics A/Solids*. 2002, no. 21 (4), pp. 573–588.

12. Ding H., Huang N. and oth. Negative Poisson’s ratio locally resonant seismic metamaterials vibration isolation barrier. *Acta Mechanica Sinica*. 2024, vol. 40, art. 523370. DOI: 10.1007/s10409-024-23370-x.

13. Xu W., Sun H., Hai H., Wang W. and Zhou C. Research on multi-oscillator locally resonant seismic metamaterials and the uniform and gradient design for broadband Rayleigh wave attenuation. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2025, vol. 37, art. 37. DOI: 10.1007/s00161-025-01368-x.

14. Li P., Yang F., Hou X., Li L., Wu J. and Fan H. A radial seismic metamaterial filled with auxetic foam for filtering low-frequency Lamb waves and surface waves. *Acta Mechanica Sinica*. 2026, vol. 42, art. 424731. (Online: 27 May 2025). DOI: 10.1007/s10409-025-24731-x.

15. Metrikine A.V. On causality of the gradient elasticity models. *Journal of Sound and Vibration*. 2006, vol. 297, no. 3–5, pp. 727–742. DOI: 10.1016/j.jsv.2006.03.050.

16. Wu Q., Xu Z., Xu P., Zeng W. And Chen X. Optimal design for rubber concrete layered periodic foundations based on the analytical approximations of band gaps and mapping relations. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2024, vol. 23, pp. 593–608. DOI: 10.1007/s11803-024-2259-3.

17. Oz M.F., Kumbasaroglu H.M. and Kumbasaroglu A. Experimental Investigation of Metamaterial-Inspired Periodic Foundation Systems with Embedded Piezoelectric Layers for Seismic Vibration Attenuation. *Buildings*. 2025, vol. 15, art. 4399. DOI: 10.3390/buildings15244399.

18. Xiang H.J., Shi Z.F., Wang S.J. and Mo Y.L. Periodic materials-based vibration attenuation in layered foundations : experimental validation. *Smart Materials and Structures*. 2012, vol. 21, no. 11, art. 112003. DOI: 10.1088/0964-1726/21/11/112003.

19. Kacin M. et al. Seismic metamaterials for low-frequency mechanical wave attenuation. *Natural Hazards*. 2021, vol. 107, pp. 213–229. DOI: 10.1007/s11069-021-04580-5.

20. Gupta A., Sharma R., Thakur A. and Gulia P. Metamaterial foundation for seismic wave attenuation for low and wide frequency band. *Scientific Reports*. 2023, vol. 13, p. 2293. DOI: 10.1038/s41598-023-27678-1.

21. Chen Z. et al. Pine-like elastic metamaterials for urban seismic Rayleigh wave attenuation. *Urban Lifeline*. 2024, vol. 2, art. 1. DOI: 10.1007/s44285-024-00012-5.

22. Maldovan M. Sound and heat revolutions in phononics. *Nature*. 2013, vol. 503, no. 7475, pp. 209–217. DOI: 10.1038/nature12608.

23. Liang X., Zhang F., Jiang J. and Chen J. Rayleigh wave metasurface with the emerging hybrid band characteristics of Auxetic metamaterials. *Applied Physics A*. 2024, vol. 130, art. 524. DOI: 10.1007/s00339-024-07689-z.

24. Yang M., Zhang S., Ding Y. and Fu Z. A combined seismic metamaterial in layered soils. *Applied Physics A*. 2024, vol. 130, art. 586. DOI: 10.1007/s00339-024-07748-5.

25. Liu H., Tian H., Tian Y., Du J., Chen G. and Pei L. Radial Seismic Metamaterials Based on Layering Theory : Broadband Shielding of Ultra-Low Frequency Seismic Surface Waves. *Frontiers in Materials*. 2022, vol. 9, art. 908058. DOI: 10.3389/fmats.2022.908058.

26. Varma T.V., Chaunsali R. and Khasgiwale S. The Influence of Clamping, Structure Geometry, and Material on Seismic Metamaterial Performance. *Frontiers in Materials*. 2021, vol. 8, art. 731433. DOI: 10.3389/fmats.2021.731433.

Надійшла до редакції: 29.01.2026.