

Многослойная защитная конструкция, напечатанная на строительном 3D-принтере. Физика прохождения упругой волны через неё

УДК 624.137

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0022>

Номер статьи: C0022

Сычева Анастасия Максимовна

д-р техн. наук, профессор,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
зав. кафедрой строительных материалов и технологий

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 9093-5541

Amsychova@yandex.ru

Нестеров Олег Сергеевич

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

адъюнкт

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 4534-7993

Nesterovoleg@gmail.ru

Шашков Алексей Иванович

канд. техн. наук,

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

факультет инженерного и электромеханического обеспечения, начальник лаборатории
Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 2439-0049

Alekseyshashkov@internet.ru

Морозов Иван Сергеевич

Войсковая часть 14003

Санкт-Петербург, Россия

Статья получена: 02.11.2025. Одобрена: 20.11.2025. Опубликована онлайн: 18.12.2025. © РИОР

Аннотация. В работе представлен анализ динамических свойств многослойных защитных конструкций, сформированных аддитивным методом (3D-печатью), с акцентом на механику упругих волн. Рассматривается эволюция от квазистатических характеристик (2010-е гг.) к динамическим (2020-е гг.), включая фрактальные структуры типа Koch для управления дисперсией волн. Аддитивное производство обеспечивает контролируемую микроструктуру с интеграцией армирующих элементов (таких как фибра), минимизируя отходы и реализуя зоны запрета по теории Блоха-Флоке. Детализирована физика упругих волн: классификация; скорости распространения; взаимодействие их с границами слоёв разных акустических импедансов. Энергопоглощение моделируется гистерезисной петлёй, с источниками диссипации: гистерезисные, конструкционные и аэрогидродинамические. Коэффициент энергопоглощения повышается армированием фиброй, с фазами разрушения: предтрещиновая, трещиновая и посттрещиновая. Цель — моделирование волновой динамики в 3D-конструкциях, выявление преимуществ и недостатков

ограждающих конструкций возведенных аддитивным способом по сравнению с традиционными монолитными изделиями.

Ключевые слова: многослойная конструкция, энергопоглощение, упругие волны, импеданс, аттенюация, фибра.

Multi-layer protective structure printed on a construction 3D printer. Physics of elastic wave passing through it

Sycheva Anastasiia Maksimovna

Dr. tech. Sciences, Professor,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Head of the Department of Construction Materials and Technologies
Saint Petersburg, Russia
Amsychova@yandex.ru

Nesterov Oleg Sergeevich

A.F. Mozhaysky Military-Space Academy,
adjunct
Saint Petersburg, Russia
Nesterovoleg@gmail.ru

Shashkov Aleksei Ivanovich

Ph.D. tech. Sciences,
A.F. Mozhaysky Military-Space Academy,
Faculty of Engineering and Electromechanical Support, Head of Laboratory
Saint Petersburg, Russia
Alekseyshashkov@internet.ru

Morozov Ivan Sergeevich

Military Unit 14003
Saint Petersburg, Russia

Abstract. The paper presents an analysis of the dynamic properties of multilayer protective structures formed by the additive method (3D printing), with an emphasis on the mechanics of elastic waves. The evolution from quasi-static characteristics (2010s) to dynamic ones (2020s), including Koch-type fractal structures for controlling wave dispersion, is considered. Additive manufacturing provides a controlled microstructure with the integration of reinforcing elements (such as fiber), minimizing waste and implementing exclusion zones according to the Bloch-Floquet theory. The physics of elastic waves is detailed: classification; propagation velocities; their interaction with the boundaries of layers of different acoustic impedances. Energy absorption is modeled by a hysteresis loop, with sources of dissipation: hysteresis, structural and aerohydrodynamic. The coefficient of energy absorption is increased by fiber reinforcement, with the phases of destruction: pre-fracture, fractured and post-fracture. The aim is to simulate wave dynamics in 3D structures, to identify the advantages and disadvantages of enclosing structures constructed in an additive way compared to traditional monolithic products.

Keywords: multilayer structure, energy absorption, elastic waves, impedance, attenuation, fiber.

Введение

В современном мире, где растёт потребность в лёгких, прочных и многофункциональных материалах для защиты от механических воздействий, таких как удары, вибрации и взрывные волны, многослойные конструкции, изготовленные с помощью 3D-печати, представляют собой перспективное направление развития [1]. В частности, ауксетические структуры, обладающие отрицательным коэффициентом Пуассона, позволяют материалам расширяться в поперечном направлении при растяжении и сжиматься при сжатии, что значительно улучшает их способность к поглощению энергии и сопротивлению деформациям [2]. Такие свойства особенно ценны в отраслях, где требуется высокая ударная стойкость, включая аэрокосмическую промышленность, автомобилестроение, военную технику и биомедицину [3].

Технология 3D-печати, или аддитивного производства, революционизировала создание сложных геометрий, недоступных традиционными методами. Она позволяет точно контролировать микроструктуру, интегрировать армирующие элементы, такие как фибра, и создавать многослойные системы без значительных отходов материала. В контексте защитных конструкций это означает возможность разработки материалов, способных эффективно гасить упругие волны — колебания, которые распространяются в материале без необратимых деформаций, но могут вызывать разрушения при резонансе или накоплении энергии.

Актуальность темы обусловлена растущим спросом на материалы с улучшенными динамическими свойствами. В условиях современных вызовов, таких как террористические угрозы, природные катастрофы и промышленные аварии, защитные конструкции должны не только выдерживать статические нагрузки, но и эффективно рассеивать энергию динамических воздействий [4]. Исследования показывают, что многослойные конструкции, напечатанные на 3D-принтере, могут создавать зоны запрета для упругих волн, предотвращая их распространение в определённых частотных диапазонах. Это открывает пути для создания "умных" материалов, адаптируемых к конкретным угрозам.

Цель статьи — проанализировать физику прохождения упругих волн через многослойные 3D-печатные защитные конструкции.

С появлением 3D-печати в 2010-х годах стало возможным реализовывать сложные архитектуры [5]. Ранние исследования фокусировались на квазистатических свойствах 2D- и 3D-структур, но к 2020-м годам акцент сместился на динамические характеристики, включая распространение упругих волн [6]. Например, в 2020-х годах были разработаны эластичные метаматериалы с Koch-фрактальными структурами для управления волнами. Исторически, переход от натуральных к синтетическим материалам и от традиционного производства к аддитивному подчёркивает эволюцию от пассивных защитных систем к активным, адаптивным конструкциям [7].

3D-печать позволяет создавать материалы, где локальные резонансы сочетаются с структурными модами для широких границами запрета [8]. В защитных конструкциях добавление фибры (например, углеродной или стеклянной) усиливает вязкоупругие свойства, повышая коэффициент потерь. Для упругих волн такие материалы обеспечивают изоляцию, предотвращая резонансные разрушения.

Многослойные 3D-печатные конструкции важны для защиты, где они поглощают энергию ударов и вибраций. Например, ауксетические сэндвич-панели превосходят традиционные структуры, поглощая на 28% больше энергии от взрывов и снижая деформации при баллистических ударах. Примеры: двойные стреловидные структуры для баллистики и круговые для анти-взрывной защиты [9].

Теоретические основы энергопоглощения многослойной конструкции

Энергопоглощение — это фундаментальный параметр, характеризующий способность материала или конструкции рассеивать кинетическую энергию внешних воздействий без потери несущей способности или полного разрушения. В расчётах ограждающих

конструкций (стены, перегородки, фасады, барьеры), оно учитывается как ключевой фактор обеспечения безопасности, долговечности и экономической эффективности [10]. Ограждающие элементы не только разделяют пространство и защищают от внешней среды, но и служат первым барьером против динамических нагрузок, где традиционные расчёты на статическую прочность (по СП 63.13330.2018) недостаточны. Игнорирование энергопоглощения приводит к недооценке рисков: конструкция может выдерживать статическую нагрузку, но разрушиться под импульсным воздействием, вызывая цепную реакцию повреждений.

Из работ Сорокина Е.С. известно, что сообщенная материалу при нагрузке работа деформации возвращается при разгрузке не полностью. Часть механической работы, затраченная на неупругие деформации и поглощаемая материалом необратимо, измеряется петлей гистерезиса (Рис. 1) [11].

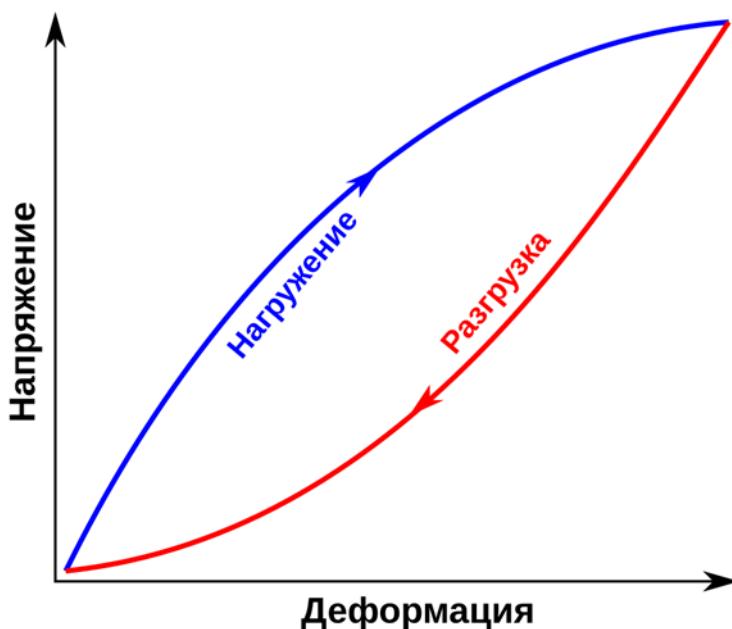


Рис. 1. Петля гистерезиса

Основные источники потерь энергии при механических колебаниях можно разделить на следующие три группы: рассеяние энергии в материале за счет его несовершенной упругости, или так называемые потери энергии в материале гистерезисного типа; рассеяние энергии на трение в углах сочленения колебательной системы, т.е. так называемое конструкционное рассеяние энергии, и рассеяние энергии за счет потерь в окружающую среду как подвижную, так и неподвижную или аэрогидродинамические потери энергии [12].

Упругие волны представляют собой механические колебания, которые распространяются в твердых телах, вызывая временные деформации без необратимых изменений в структуре материала. Эти волны возникают при приложении внешних сил, таких как удары, вибрации или сейсмическая активность, и играют ключевую роль в динамическом поведении материалов. В контексте многослойных защитных конструкций, напечатанных на 3D-принтере, понимание физики прохождения упругих волн критически важно для выработки систем, способных гасить вибрации, поглощать энергию и предотвращать разрушения [13]. Такие конструкции, позволяют манипулировать волнами через зоны запрета, где волны затухают, обеспечивая повышенную стойкость к динамическим нагрузкам, изоляции и акустического контроля в защитных приложениях.

Упругие волны включают продольные (сжатия-растяжения) и поперечные (сдвиговые) волны, скорость которых определяется плотностью и модулем упругости:

$$c = \sqrt{E/\rho}, \quad (1)$$

где E — модуль Юнга,
 ρ — плотность.

Упругие волны классифицируются по типу деформации: продольные (P -волны), где колебания происходят вдоль направления распространения, вызывая сжатие и растяжение; поперечные (S -волны), где колебания перпендикулярны направлению; и поверхностные волны, такие как волны Рэлея, которые распространяются по границе материала [14]. Скорость распространения зависит от свойств среды: для продольных волн:

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (2)$$

где E — модуль Юнга,
 ν — коэффициент Пуассона,
 ρ — плотность;
для поперечных:

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (3).$$

В многослойных структурах волны взаимодействуют с границами слоёв, вызывая отражения и преломления из-за несоответствия акустических импедансов [15].

Отражение волны на границах — это фундаментальное явление в волновой механике, возникающее при взаимодействии волны (акустической, электромагнитной, упругой или любой другой) с границей раздела двух сред с разными физическими свойствами. Это происходит, когда волна, распространяющаяся в одной среде, достигает границы раздела и частично отражается обратно, а частично преломляется (переходит) в другую среду. Отражение приводит к интерференции, стоячим волнам или потере энергии, что критично для приложений в акустике, сейсмологии, материаловедении и защитных конструкциях [16].

Физическая причина отражения — несоответствие акустических (или механических) импедансов сред. Импеданс Z — это сопротивление среды распространению волны, определяемое как:

$$Z = \rho c, \quad (4)$$

где ρ — плотность,
 c — скорость волны в среде.

Переход к неоднородным, многослойным средам усложняет картину. В таких структурах волны взаимодействуют с границами слоев, где несоответствие акустических импедансов приводит к отражениям и преломлениям. Коэффициент отражения:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (5)$$

преломления:

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (6)$$

где индексы 1 и 2 обозначают слои. В многослойных системах, волны демонстрируют анизотропию из-за инфилл-структур, где скорость и ослабление волны зависят от направления распространения [17].

Если импедансы равны ($Z_1=Z_2$), волна проходит без отражения ($R=0$). При различии волн "замечает" границу, и часть энергии отражается, аналогично тому, как свет отражается от зеркала или звук от стены.

Представьте упругую волну (например, продольную Р-волну), распространяющуюся в твёрдой среде (слой 1 с Z_1). На границе со средой 2 (Z_2) волна вызывает локальные деформации: частицы в первой среде "толкают" вторую, но из-за разницы импедансов часть импульса возвращается обратно. Это аналогично столкновению шариков разной массы: лёгкий шарик, ударяя о тяжёлый, отскакивает [18].

Для открытой границы (свободная поверхность, $Z_2=0$, как воздух): волна полностью отражается с инверсией фазы (амплитуда меняет знак), так как импеданс воздуха пренебрежимо мал. Это вызывает спаллинг (отслоение) в конструкциях под ударом.

Для фиксированной границы ($Z_2 > Z_1$): отражение без инверсии, волна "отскакивает" как от стены.

В многослойных конструкциях отражения на каждой границе накапливаются, вызывая интерференцию: конструктивная усиливает волну, деструктивная — гасит, создавая аттенюацию [19].

Аттенюация — ключевой механизм защиты, где энергия волны преобразуется в тепло или рассеивается. В многослойных материалах, в частности 3D-печатных структурах, она достигается через микроструктурные нестабильности. В ауксетических материалах аттенюация усиливается синкластическим поведением, где деформация распределяется равномерно, поглощая энергию на 100–200% больше, чем в обычных материалах [20].

Изготовление многослойных конструкций с помощью 3D-печати (Рис. 2) представляет собой инновационный подход, позволяющий создавать сложные архитектуры с контролируемыми свойствами, такими как прочность, гибкость и энергопоглощение [21]. Эти конструкции часто основаны на принципах, где слои с разными материалами или геометриями интегрируются для достижения уникальных механических характеристик. Процесс включает подготовку цифровой модели, выбор материалов, печать слой за слоем и пост-обработку. В отличие от традиционных методов, таких как литьё или механообработка, 3D-печать обеспечивает высокую точность и минимизирует отходы, что особенно важно для защитных структур, предназначенных для поглощения ударов или вибраций [22].

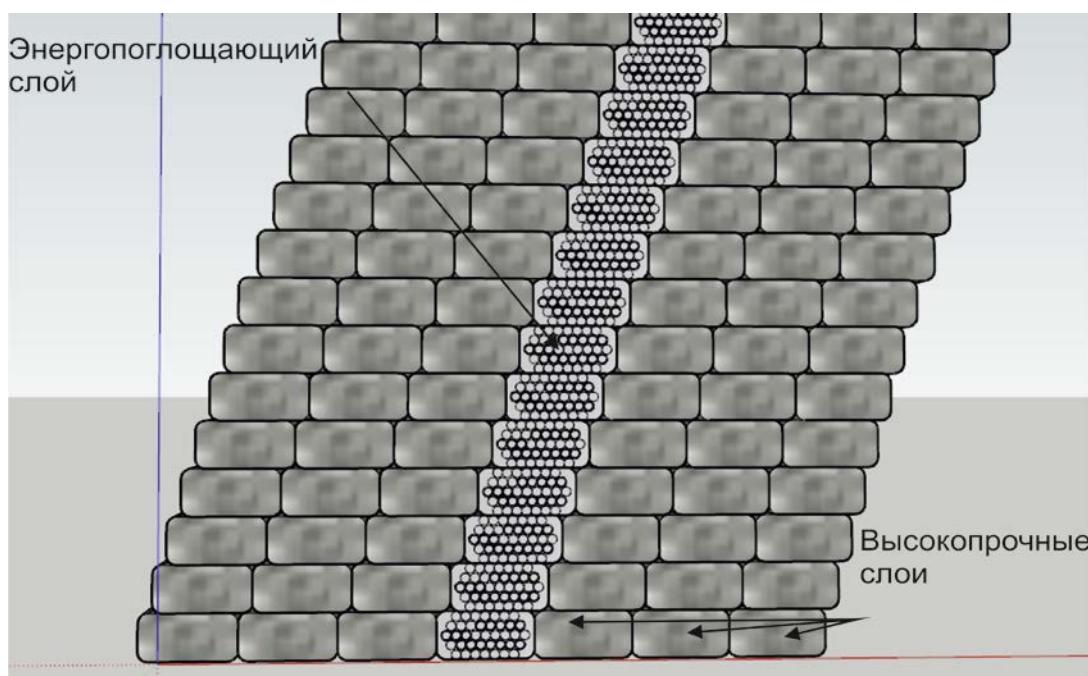


Рис. 2. Многослойная конструкция, напечатанная на 3D принтере

Согласно обзору современных достижений, 3D-печать позволяет фабриковать материалы с иерархическими структурами, включая многослойные решётки и оригами-подобные дизайны, которые могут быть адаптированы для защитных применений [23].

Например, в процессах, ориентированных на механические метаматериалы, акцент делается на создании периодических структур, где каждый слой способствует общим свойствам, таким как отрицательный коэффициент Пуассона или зоны запрета для волн.

Для периодических структур, применяется теория Блоха-Флоке, где дисперсионные кривые показывают зоны пропускания и запрета [24]. В зонах запрета волны экспоненциально затухают, что достигается через Брэгговское рассеяние или локальные резонансы [25].

Физика упругих волн в таких конструкциях обеспечивает основу для инновационных защитных систем, комбинируя аттенюацию, зоны запрета и аномальные свойства [26].

Энергопоглощающая способность ограждающей конструкции, армированной фиброй

В условиях динамических нагрузок, включая ударные воздействия (от транспортных средств, обвалов или взрывов), сейсмическую активность или даже высокоскоростные деформации от промышленных процессов, энергопоглощающая способность становится определяющим фактором выживания конструкции. Эта способность характеризует объём энергии, который материал или структура может рассеять без необратимого разрушения, измеряемый в единицах Дж/м³ или специфической энергии поглощения в Дж/г, и напрямую влияет на безопасность людей и имущества [27].

Добавление фибры в слои усиливает аттенюацию, распределяя напряжения и предотвращая трещины. В 3D-печатных ауксетических структурах фибра повышает энергопоглощение на 50–130%.

Армирование фиброй в бетонных ограждающих конструкциях — это метод микро- и макроуровневого усиления, где короткие волокна (диаметр 0,1–1 мм, длина 3–60 мм) равномерно распределяются в бетонной матрице для повышения трещиностойкости и пластичности. В отличие от традиционного армирования стальными прутьями, фибра обеспечивает трёхмерное распределение нагрузок, предотвращая локальные трещины и повышая посттрещиновую прочность. Наличие фибры может увеличить энергопоглощающую способность на 100–300% по сравнению с обычным бетоном, особенно под динамическими нагрузками, где коэффициент динамического усиления достигает 1,5–2,0 [28].

Энергопоглощение в ограждающих конструкциях — это многостадийный процесс, зависящий от микроструктуры материала и геометрии элемента. В обычном бетоне (без армирования) энергия поглощается преимущественно за счёт эластичной деформации (до 0,1–0,2% деформации) и последующего хрупкого разрушения, с специфической энергии поглощения около 1–5 кДж/м³ под статической нагрузкой и до 10 кДж/м³ под динамической. Разрушение происходит внезапно: трещины распространяются со скоростью 100–1000 м/с, приводя к потере несущей способности.

Фиброармирование вводит новые механизмы, делая процесс постепенным:

1. Предтрещиновая фаза: Фибра повышает предельную прочность на растяжение на 20–50%, задерживая образование микротрещин. Энергия рассеивается через вязкоупругие потери в матрице и на интерфейсе фибра-матрица.

2. Трещиновая фаза: Волокна "мостят" трещины, перенося нагрузку через трение и адгезию. Это увеличивает длину трещин и площадь разрушения, повышая вязкость.

3. Посттрещиновая фаза: Фибра обеспечивает остаточную прочность 20–50% от пиковой, позволяя конструкции выдерживать дополнительные деформации.

4. Динамическая диссипация: Под высокоскоростными нагрузками фибра снижает коэффициент динамического усиления для растяжения (1,2–1,5 вместо 2–4 для бетона), повышая специфической энергии поглощения на 150–250%.

В ограждающих конструкциях (панели 100–500 мм толщиной) фибра особенно эффективна против импульсных нагрузок, где энергия распределяется по объёму, предотвращая локальный прорыв.

Тип фибры определяет доминирующие механизмы: металлические фибры усиливают жёсткость, полимерные — вязкость, натуральные — экологичность. Эксперименты 2020–2025 годов показывают:

1. Стальные фибры

Стальные волокна (диаметр 0,5–1 мм, длина 30–60 мм) наиболее эффективны для динамического сжатия. В бетонах со сверхвысокими эксплуатационными характеристиками с 2% содержанием стальной фибры специфическая энергия поглощения под ударом растёт на 200%, коэффициент рассеяния энергии — до 0,9, ударная вязкость при сжатии: +50–100% к, но коррозия снижает долговечность на 20–30% в агрессивных средах. Например, в панелях под взрывом (1–5 МПа) сталь повышает специфическую энергию поглощения с 8 кДж/м³ до 24 кДж/м³ [29].

2. Полимерные фибры

Полипропиленовые фибры (с содержанием в общем объеме 0,5–1%) улучшают поглощение энергии при растяжении на 100–150%, благодаря низкой плотности и высокой эластичности (модуль 3–10 ГПа), показатель ударной вязкости растёт на 150%, специфическая энергия поглощения — до 15 кДж/м³ [30].

3. Базальтовые и гибридные фибры

Базальтовые фибры (с содержанием в общем объеме 0,5–1,5%) балансируют: специфическая энергия поглощения +70–120%, коррозионностойкость как у стекла. Гибридные (стальная и полимерная фибра, 1% + 0,5%) дают синергию: специфическая энергия поглощения +216%, пластичность +43%. Тесты на гибридных фибробетонах с базальтовой фиброй показывают коэффициент рассеяния энергии 0,85 под скоростью деформации 10³ с⁻¹.

Сравнительный анализ энергопоглощения материалов с различными типом фибры представлен в Таблице 1.

Таблица 1
**Сравнительный анализ энергопоглощения материалов
с различными типом фибры**

Тип фибры	Специфическая энергия поглощения, (кДж/м ³)	Увеличение, (%)	Коэффициент рассеяния энергии
Без фибры	5–10	-	0,3–0,5
Стальная	15–30	+200–300	0,8–0,9
Полимерная	12–20	+120–200	0,6–0,8
Базальтовая	10–18	+100–180	0,7–0,85
Гибридная	20–35	+300–400	0,9–0,95

Таким образом, фибра увеличивает специфическую энергию поглощения ограждающих конструкций на 100–300%, делая их пластичными и ударостойкими.

Выводы

Энергопоглощающая способность многослойных защитных конструкций, напечатанных на 3D-принтере, представляет собой ключевой аспект их функциональности, определяющий способность материалов и структур преобразовывать кинетическую энергию ударов, вибраций или волн в другие формы энергии, такие как тепло, пластическая деформация или внутренние потери, без полного разрушения. В контексте 3D-печатных материалов и ауксетических структур эта способность усиливается за счет многослойного дизайна, где чередование слоев с разными плотностями, жесткостью и микроструктурами позволяет оптимизировать поглощение. Такие конструкции, демонстрируют превосходные

свойства по сравнению с монолитными материалами, достигая специфической энергии поглощения при низкой плотности. Это особенно важно для защитных применений, включая баллистическую защиту, виброзоляцию и сейсмостойкость, где требуется минимизировать передачу энергии на защищаемый объект.

Энергопоглощение в таких структурах происходит через несколько механизмов: эластическая и пластическая деформация, изгиб, фрикционные потери, резонансные эффекты и вязкоупругие диссипации. В многослойных системах слои могут быть функционально градиентными, где внешние слои обеспечивают жесткость, а внутренние — амортизацию, что приводит к контролируемому распределению энергии. Добавление фибры или наночастиц в слои усиливает эти свойства, повышая вязкость на 50–130% и предотвращая распространение трещин. В защитных свойствах это проявляется в способности выдерживать низкоскоростные удары, взрывные волны и вибрации, делая конструкции подходящими для защитной ограждающей конструкции.

Несмотря на преимущества, существуют ограничения:

1. ванизотропия 3D-печатных слоёв может привести к неравномерному распространению волн, особенно в направлениях, перпендикулярных печати, что требует дополнительной оптимизации дизайна;
2. высокая стоимость оборудования и материалов ограничивает масштабирование, хотя цены снижаются с развитием технологий;
3. интеграция фибры может вызвать проблемы с реологией смеси, снижая печатаемость и равномерность распределения, что влияет на энергопоглощение.
4. отсутствие стандартов для тестирования динамических свойств и потенциальную деградацию под экстремальными условиями, такими как высокие температуры или коррозия.

Эти ограничения подчёркивают необходимость дополнительного исследований в области материаловедения и моделирования для повышения надежности.

В заключение, многослойные защитные конструкции, напечатанные на 3D-принтере, представляют собой прорыв в материаловедении, объединяя аддитивное производство и передовую физику волн для создания материалов будущего. Они не только повышают безопасность и эффективность, но и открывают пути к устойчивым инновациям. По мере преодоления текущих ограничений эти технологии трансформируют защитные системы, делая их умнее, легче и адаптивнее. Это подчеркивает важность междисциплинарных подходов для решения глобальных вызовов, где наука и инженерия сливаются для создания более безопасного мира.

Список литературы

1. Bertoldi K. Harnessing instabilities to design tunable architected cellular materials // Annual Review of Materials Research. 2017. Vol. 47. P. 51–70.
2. Jiang Y., Li Y. 3D printed auxetic structures with enhanced mechanical properties // Additive Manufacturing. 2020. Vol. 36. P. 101412.
3. Abueidda D.W. et al. Mechanical properties of 3D-printed polymeric cellular structures with negative Poisson's ratio // Additive Manufacturing. 2019. Vol. 30. P. 100886.
4. Hussein M.I., Leamy M. J., Ruzzene M. Dynamics of phononic materials and structures: Historical origins, recent progress and future outlook // Applied Mechanics Reviews. 2014. Vol. 66. No. 4. P. 040802. <https://doi.org/10.1115/1.4026911>
5. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 143. P. 172–196.
6. Matlack K.H. et al. Composite 3D-printed metastructures for low-frequency vibration absorption // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2016. – Vol. 113. – No. 30. – P. 8386–8390.
7. Sigmund O., Maute K. Topology optimization approaches // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2013. – Vol. 48. – No. 6. – P. 1031–1055.

8. Craster R.V., Guenneau S. Acoustic metamaterials: Negative refraction, imaging, lensing and cloaking // Springer Series in Materials Science. – 2013. – Vol. 166. – 378 p.
9. Jiang Y., Li Y. Auxetic materials for energy absorption // Materials & Design. – 2021. – Vol. 204. – P. 109661.
10. Brandt A.M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering // Journal of Advanced Concrete Technology. – 2008. – Vol. 6. – No. 3. – P. 403–430.
11. Сорокин Е.С. Механические потери в упругих материалах // Известия АН СССР. Механика твердого тела. – 1965. – № 4. – С. 45–52.
12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: Наука, 1987. – 232 с.
13. Auriault J.-L. et al. Wave propagation in heterogeneous media // Springer. – 2009. – 276 p.
14. Auld B.A. Acoustic fields and waves in solids. – New York: Wiley, 1973. – Vol. 1. – 425 p.
15. Brekhovskikh L.M. Waves in layered media. – New York: Academic Press, 1980. – 556 p.
16. Kinsler L.E. et al. Fundamentals of acoustics. – New York: Wiley, 2000. – 4th ed. – 576 p.
17. Torrent D., Sánchez-Dehesa J. Anisotropic mass density by gradient-index transformation // New Journal of Physics. – 2012. – Vol. 14. – P. 053026.
18. Graff K.F. Wave motion in elastic solids. – New York: Dover, 1991. – 546 p.
19. Hussein M.I. et al. Dynamics of phononic materials and structures // Applied Mechanics Reviews. – 2014. – Vol. 66. – P. 040802.
20. Ren X. et al. Auxetic metamaterials and structures: A review // Smart Materials and Structures. – 2018. – Vol. 27. – No. 3. – P. 033001.
21. Zhang Q. et al. 3D printed auxetic structures for protective applications // Additive Manufacturing. – 2022. – Vol. 49. – P. 102482.
22. Ambrosi A., Pumera M. 3D-printing technologies for unfilled thermoplastic composites // Chemical Society Reviews. – 2016. – Vol. 45. – No. 23. – P. 6331–6351.
23. Maconachie T. et al. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges // Materials & Design. – 2019. – Vol. 183. – P. 108137.
24. Brillouin L. Wave propagation in periodic structures: Electric filters and crystal lattices. – New York: McGraw-Hill, 1946. – 246 p.
25. Kittel C. Introduction to solid state physics. – New York: Wiley, 2005. – 8th ed. – 704 p.
26. Craster R.V., Guenneau S. Acoustic metamaterials. – Dordrecht: Springer, 2013. – 378 p.
27. Yoo J.H. et al. Energy absorption characteristics of fiber-reinforced concrete under dynamic loading // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 278. – P. 122392.
28. Yoo J.H., Yoon Y.S. Effect of fiber content on the dynamic properties of fiber-reinforced concrete // Cement and Concrete Research. – 2022. – Vol. 152. – P. 106659.
29. Zhou J. et al. Dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced concrete under impact loading // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 269. – P. 121244.
30. Yoo D.Y., Banthia N. Mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced concrete under dynamic loading // Cement and Concrete Composites. – 2020. – Vol. 114. – P. 103757.

References

1. Bertoldi K. Harnessing instabilities to design tunable architected cellular materials // Annual Review of Materials Research. – 2017. – Vol. 47. – P. 51–70.
2. Jiang Y., Li Y. 3D printed auxetic structures with enhanced mechanical properties // Additive Manufacturing. – 2020. – Vol. 36. – P. 101412.
3. Abueidda D.W. et al. Mechanical properties of 3D-printed polymeric cellular structures with negative Poisson's ratio // Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 30. – P. 100886.
4. Hussein M.I. et al. Dynamics of phononic materials and structures: Historical origins, recent progress and future outlook // Applied Mechanics Reviews. – 2014. – Vol. 66. – No. 4. – P. 040802.
5. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // Composites Part B: Engineering. – 2018. – Vol. 143. – P. 172–196.

6. Matlack K.H. et al. Composite 3D-printed metastructures for low-frequency vibration absorption // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2016. – Vol. 113. – No. 30. – P. 8386–8390.
7. Sigmund O., Maute K. Topology optimization approaches // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2013. – Vol. 48. – No. 6. – P. 1031–1055.
8. Craster R.V., Guenneau S. Acoustic metamaterials: Negative refraction, imaging, lensing and cloaking // Springer Series in Materials Science. – 2013. – Vol. 166. – 378 p.
9. Jiang Y., Li Y. Auxetic materials for energy absorption // Materials & Design. – 2021. – Vol. 204. – P. 109661.
10. Brandt A.M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering // Journal of Advanced Concrete Technology. – 2008. – Vol. 6. – No. 3. – P. 403–430.
11. Sorokin, E. S., Mechanical losses in elastic materials, Izvestiya AN SSSR. Solid state mechanics. 1965, No. 4, pp. 45-52.
12. Landau L. D., Lifshits E. M. Teoriya uprugosti [Theory of elasticity], Moscow: Nauka Publ., 1987, 232 p.
13. Auriault J.-L. et al. Wave propagation in heterogeneous media // Springer. – 2009. – 276 p.
14. Auld B.A. Acoustic fields and waves in solids. – New York: Wiley, 1973. – Vol. 1. – 425 p.
15. Brekhovskikh L.M. Waves in layered media. – New York: Academic Press, 1980. – 556 p.
16. Kinsler L.E. et al. Fundamentals of acoustics. – New York: Wiley, 2000. – 4th ed. – 576 p.
17. Torrent D., Sánchez-Dehesa J. Anisotropic mass density by gradient-index transformation // New Journal of Physics. – 2012. – Vol. 14. – P. 053026.
18. Graff K.F. Wave motion in elastic solids. – New York: Dover, 1991. – 546 p.
19. Hussein M.I. et al. Dynamics of phononic materials and structures // Applied Mechanics Reviews. – 2014. – Vol. 66. – P. 040802.
20. Ren X. et al. Auxetic metamaterials and structures: A review // Smart Materials and Structures. – 2018. – Vol. 27. – No. 3. – P. 033001.
21. Zhang Q. et al. 3D printed auxetic structures for protective applications // Additive Manufacturing. – 2022. – Vol. 49. – P. 102482.
22. Ambrosi A., Pumera M. 3D-printing technologies for unfilled thermoplastic composites // Chemical Society Reviews. – 2016. – Vol. 45. – No. 23. – P. 6331–6351.
23. Maconachie T. et al. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges // Materials & Design. – 2019. – Vol. 183. – P. 108137.
24. Brillouin L. Wave propagation in periodic structures: Electric filters and crystal lattices. – New York: McGraw-Hill, 1946. – 246 p.
25. Kittel C. Introduction to solid state physics. – New York: Wiley, 2005. – 8th ed. – 704 p.
26. Craster R.V., Guenneau S. Acoustic metamaterials. – Dordrecht: Springer, 2013. – 378 p.
27. Yoo J.H. et al. Energy absorption characteristics of fiber-reinforced concrete under dynamic loading // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 278. – P. 122392.
28. Yoo J.H., Yoon Y.S. Effect of fiber content on the dynamic properties of fiber-reinforced concrete // Cement and Concrete Research. – 2022. – Vol. 152. – P. 106659.
29. Zhou J. et al. Dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced concrete under impact loading // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 269. – P. 121244.
30. Yoo D.Y., Bantia N. Mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced concrete under dynamic loading // Cement and Concrete Composites. – 2020. – Vol. 114. – P. 103757.