

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ. НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.11

Интеллектуальные и многофункциональные материалы нового поколения для экологичного строительства

Баласубраманиан Кандасубраманиан

Оборонный институт передовых технологий; г. Пуна, Индия

АННОТАЦИЯ

Введение. Быстрая урбанизация и необходимость декарбонизации застроенной среды сделали здания критически важной сферой для обеспечения устойчивости и климатической устойчивости с помощью материалов. По мере того как здания превращаются из статических потребителей энергии в адаптивные и ориентированные на производительность системы, достижения в области материалов нового поколения переопределяют вклад конструктивных элементов и элементов ограждающих конструкций в энергоэффективность, функциональность и интеллектуальное управление.

Материалы и методы. Обобщены последние достижения в области интеллектуальных и многофункциональных материалов, включая термоадаптивные системы, архитектурно-механические метаматериалы и функциональные композиты, собирающие энергию, которые позволяют встроить в строительные материалы датчики, средства преобразования энергии и адаптивные механизмы реагирования.

Результаты. Особое внимание уделяется материалам с фазовым переходом для терморегулирования, механическим метаматериалам с инженерной геометрией для гашения вибраций и механической адаптивности, а также трибоэлектрическим, пьезоэлектрическим и термоэлектрическим композитам, которые поддерживают распределенное извлечение энергии и автономное зондирование. Эти материальные системы позволяют зданиям функционировать как энергоактивные и информационно-осознанные инфраструктуры, а не как пассивные структурные объекты. Рассматриваются функциональное поведение, реакция на окружающую среду и значимость характеристик систем интеллектуальных материалов для применения в строительстве.

Выводы. Обобщая последние достижения и определяя критически важные функции на уровне материалов, намечены пути будущего развития интеллектуальных, низкоуглеродных и устойчивых к изменению климата зданий, которые становятся возможными благодаря передовым системам интеллектуальных материалов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: интеллектуальные материалы, экологичные здания, многофункциональные композиты, экологически устойчивые строительные материалы

Благодарности. Автор выражает благодарность д-ру Б.Х.С.В. Нараяне Мурти, проректору Института передовых технологий Министерства обороны DIAT (DU), Пуна, за его постоянную поддержку и мотивацию, а также г-же Шрути Гупту и всем сотрудникам лаборатории аддитивного производства DIAT (DU) за их постоянную и ценную поддержку на протяжении всего исследования.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кандасубраманиан Б. Интеллектуальные и многофункциональные материалы нового поколения для экологичного строительства // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 2. Ст. 11. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.11

Автор, ответственный за переписку: Баласубраманиан Кандасубраманиан, meetkbs@gmail.com.

Next-Generation Smart and Multifunctional Materials for Green Buildings

Balasubramanian Kandasubramanian

Defence Institute of Advanced Technology; Pune, India

ABSTRACT

Introduction. Rapid urbanization and the imperative to decarbonize the built environment have positioned buildings as a critical domain for materials-driven sustainability and climate resilience. As buildings evolve from static energy consumers to adaptive and performance-oriented systems, advances in next-generation materials are redefining the contribution of structural and envelope components to energy efficacy, functionality, and intelligent operation.

Materials and methods. This review synthesizes recent progress in smart and multifunctional materials, including thermal-adaptive systems, architected mechanical metamaterials, and energy-harvesting functional composites that enable sensing, energy conversion, and adaptive response to be intrinsically embedded within building materials.

Results. Particular emphasis is placed on phase change materials for thermal regulation, geometry-engineered mechanical metamaterials for vibration mitigation and mechanical adaptability, and triboelectric, piezoelectric, and thermoelectric composites that support distributed energy harvesting and self-powered sensing. These material systems enable buildings to operate as energy-active and information-aware infrastructures rather than passive structural entities. The review further contextualizes the functional behavior, environmental response, and performance relevance of smart material systems for building-scale applications.

Conclusions. By consolidating recent advances and identifying critical material-level functions, this work outlines future pathways for the development of intelligent, low-carbon, and climate-resilient buildings enabled through advanced smart material systems.

KEYWORDS: smart materials, green buildings, multifunctional composites, sustainable construction materials

Acknowledgements. The author would like to express gratitude towards Dr. B.H.S.V. Narayana Murthy, Vice-Rector of DIAT (DU), Pune, for his constant support and motivation, would also like to thank Ms. Shruti Gupta along with all the lab members of the additive manufacturing lab, DIAT (DU) for their continuous and valuable support throughout the study.

FOR CITATION: Kandasubramanian B. Next-Generation Smart and Multifunctional Materials for Green Buildings. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2026; 16(2):11. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.2.11

Corresponding author: Balasubramanian Kandasubramanian, meetkbs@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость декарбонизации человеческой деятельности и повышения устойчивости к изменению климата сделала строительный сектор ключевой областью для технологических вмешательств и реформ. Ускоренная урбанизация, растущие потребности в энергии для эксплуатации и непропорционально высокая нагрузка на окружающую среду, связанная с традиционными строительными процессами, в совокупности подчеркивают целесообразность пересмотра парадигм проектирования материалов в секторе застроенной среды [1]. Современные строительные практики ответственны за значительную долю глобальных антропогенных выбросов CO₂, добычи ресурсов и образования твердых отходов, что требует внедрения инновационных решений, основанных на передовом материаловедении [2]. Недавние оценки еще больше подчеркивают эту актуальность: согласно отчету о состоянии дел UNEP GlobalABC за 2024/2025 г., сектор зданий и строительства вносит примерно 34–37 % в общий объем выбросов CO₂, связанных с энергетикой, что делает его крупнейшим отдельным сектором, способствующим изменению климата [3]. Эти выбросы включают не только углерод, образующийся в процессе эксплуатации в результате отопления, охлаждения, вентиляции, освещения и использования бытовой техники, но и углерод, заложенный в добыче материалов, производстве цемента и стали, транспортировке и строительных работах на объекте. Компонент заложенного углерода все чаще признается в качестве доминирующего фактора на протяжении всего жизненного цикла высокоэффективных зданий, поскольку эксплуатационная эффективность повышается за счет теплоизоляции, электрификации и интеграции возобновляемых источников энергии [4, 5].

В связи с растущей углеродной ответственностью инновации в области строительных материалов становятся ключевым механизмом, с помощью которого строительный сектор может выполнить национальные и международные требования по декарбо-

низации, включая цели ООН в области устойчивого развития (ЦУР), в частности ЦУР 7 «Доступная и чистая энергия», 9 «Промышленность, инновации и инфраструктура», 11 «Устойчивые города и населенные пункты», 12 «Устойчивое потребление и производство» и 13 «Меры по борьбе с изменением климата и его последствиями», каждая из которых определяет чистую энергию, города с устойчивой инфраструктурой и ответственное использование материалов в качестве основных приоритетов развития [6].

В этом контексте разработка, характеристика и широкомасштабная интеграция материалов нового поколения для производства экологически чистых зданий представляют собой стратегически значимый путь к созданию низкоуглеродной, ресурсоэффективной и адаптированной к климату инфраструктуры. Передовые системы материалов, разработанные с учетом многофункциональности, долговечности и внутренней адаптивности, открывают возможности для отделения эксплуатационных характеристик конструкций от интенсивности использования материалов, сокращения выбросов, связанных с техническим обслуживанием, а также встраивания энергетических и сенсорных функций непосредственно в конструкцию здания [7, 8].

На рис. 1 представлен схематический обзор основных классов материалов, которые в настоящее время продвигаются для использования в экологических и «умных» зданиях, и показано, как биоматериалы, переработанные материалы, гибридные и «умные» функциональные материалы в совокупности способствуют проектированию низкоуглеродных и многофункциональных зданий.

В рамках этой формирующейся парадигмы «умных» зданий материалы играют основополагающую роль, одновременно выступая в качестве несущих элементов, функциональных интерфейсов и активных преобразователей энергии и информации. В отличие от традиционных строительных материалов, системы материалов нового поколения разработаны так, чтобы демонстрировать внутреннюю способность реагировать на тепловые, механические, элек-

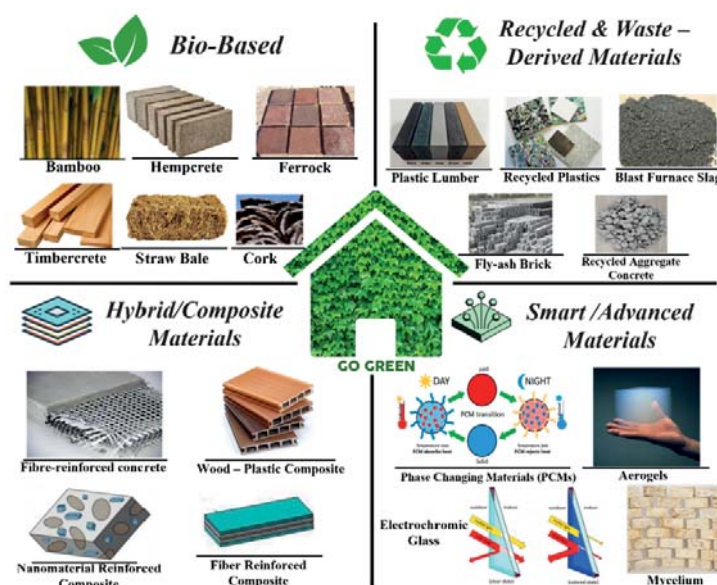


Рис. 1. Устойчивые материалы, используемые для строительства экологических зданий

трические и экологические стимулы, позволяя строительным компонентам воспринимать, адаптироваться и реагировать без опоры на внешние устройства [9, 10]. Такая ориентированность на материалы достигается за счет разработки интеллектуальных и многофункциональных материалов, которые интегрируют возможности терморегулирования, сбора энергии, сенсорного контроля и приведения в действие непосредственно в конструкцию здания.

Выходя за рамки классического дискурса об устойчивом развитии, сосредоточенного на сокращении углеродного следа и эффективном использовании ресурсов, концепция «умных зданий» вводит многогранную структуру, в которой материалы являются не просто пассивными структурными элементами, а активными участниками взаимодействия с окружающей средой, модуляции энергии и автономной адаптации [11]. Современные определения «умных зданий» подчеркивают важность интегрированной киберфизико-материальной архитектуры, в которой конструктивные элементы обладают термофизической адаптивностью, децентрализованным преобразованием энергии, возможностью сбора данных в режиме реального времени, обнаружением повреждений и автономной функциональной реконфигурацией. Указанные возможности обусловлены не только механическими или электрическими подсистемами, но все в большей степени внутренними функциональными возможностями, заложенными в передовых системах материалов. Переход от пассивных к интеллектуальным материалам представляет собой важную границу в достижении высокоэффективных, нулевых по выбросам и устойчивых к климатическим изменениям строительных технологий [12]. Этот сдвиг парадигмы выходит за рамки традиционного строительства за счет внедрения многофункциональных материалов и адаптивных компонентов, которые синергетически

взаимодействуют с системами управления зданием (BMS), тем самым обеспечивая динамический контроль над параметрами теплового режима, освещения, конструкции и качества воздуха [13].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В этом контексте в данной обзорной статье рассматриваются интеллектуальные и многофункциональные материалы нового поколения как средства создания экологических, интеллектуальных и устойчивых к климатическим изменениям зданий. В обзоре анализируются ключевые классы материалов, включая термоадаптивные материалы, архитектурно-механические метаматериалы и функциональные композиты, собирающие энергию, с акцентом на состав материалов, микроструктурный дизайн и поведение, определяемое геометрией, обеспечивающее терморегуляцию, механическую адаптивность, преобразование энергии и самодиагностику в конструктивных элементах и элементах ограждающих конструкций. Также обсуждается, как внутренние функциональные возможности материалов, такие как термофизическая адаптивность, преобразование энергии и самодиагностика, могут быть встроены непосредственно в конструктивные элементы и элементы ограждающих конструкций, тем самым снижая зависимость от вспомогательных механических или электрических подсистем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Интеллектуальные и многофункциональные материалы для экологически устойчивого строительства

Термоадаптивные интеллектуальные материалы

Термоадаптивные интеллектуальные материалы составляют основной функциональный класс в ин-

теллектуальных и экологически устойчивых зданиях, обеспечивая динамическую регулировку теплопередачи, солнечного нагрева и аккумуляирования тепла в ответ на воздействия окружающей среды. Эти материалы работают за счет обратимого изменения своих теплофизических или оптических свойств, таких как теплопроводность, теплоемкость, инфракрасная излучательная способность или солнечная пропускательная способность, при изменениях температуры, солнечной радиации или условий окружающей среды. В отличие от традиционных пассивных систем теплоизоляции, термоадаптивные материалы активно взаимодействуют с суточными и сезонными тепловыми циклами, позволяя ограждающим конструкциям, фасадам и внутренним элементам здания регулировать тепловой поток в режиме реального времени [14]. Такое адаптивное поведение способствует снижению нагрузки на системы отопления и охлаждения, пикового спроса на энергию и теплового дискомфорта жильцов, тем самым обеспечивая энергоэффективную и климатоустойчивую эксплуатацию здания. Интеграция таких материалов в стены, системы остекления, крыши и гибридные конструкции ограждающих элементов позволяет встроить тепловые функции непосредственно в структуру здания, снижая зависимость от механических систем и одновременно повышая долгосрочную эксплуатационную эффективность и устойчивость.

Тепловая адаптивность все чаще выходит за рамки внутренней реакции материалов благодаря интеграции неинвазивного, основанного на данных распознавания тепловой адаптации человека в стратегии терморегулирования зданий. W. Duan и соавт. продемонстрировали, что теплоадаптивное поведение жильцов можно определять в реальном времени с помощью основанных на зрительном восприятии кросс-модальных систем дистилляции знаний, что обеспечивает точное распознавание поведения при сниженной вычислительной сложности и облегчает внедрение интеллектуального управления системами отопления, вентиляции и кондиционирования (HVAC) [15]. Это исследование демонстрирует, что поведенческие сигналы могут служить надежными управляющими сигналами для динамической регулировки теплового режима в помещениях без использования инвазивных датчиков. В дополнение к этому подходу Y. Bai и соавт. разработали инфракрасную систему пространственно-временного моделирования, идентифицирующую одиннадцать типичных видов поведения, связанного с термоадаптацией, достигнув точности распознавания до 95,89 % и точности прогнозирования тепловых ощущений 96,24 %, при этом сохранив устойчивость к изменчивому освещению и обеспечив конфиденциальность жильцов [16]. В исследовании использовались контролируемые тепловые условия 22–25, 25–27 и 27–30 °C, при этом участники сидели в тишине в течение 20 мин для тепловой акклиматизации перед сбором данных, а видеозаписи осуществлялись одно-

временно с пяти ракурсов для обеспечения всесторонней фиксации теплоадаптивного поведения [17]. Расширяя термоадаптивность на наружные условия, H. Li и соавт. объединили инфракрасную термографию с мониторингом поведения, чтобы количественно оценить взаимосвязь между температурой кожи пешеходов, физиологической эквивалентной температурой (PET) и адаптивными реакциями, выявив стабилизацию температуры кожи при значениях PET примерно 40–46 °C в зависимости от типа активности, и определив поведение, связанное с поиском тени, как наиболее эффективную стратегию смягчения последствий экстремального теплового стресса [18]. Кроме того, K. Li и соавт. продемонстрировали, что тепловую адаптивность можно также реализовать на микроструктурном уровне с помощью фотонных металлоорганических каркасов, демонстрирующих термически усиленную люминесценцию, сверхвысокую светоотдачу (~49 700 фотонов на МэВ) и стабильность, превышающую 95 % после длительного теплового и радиационного воздействия [19]. В то время как микроструктурная инженерия обеспечивает внутреннюю термоадаптивность, неинвазивная оценка термоадаптивного поведения и комфорта обеспечивает обратную связь на системном уровне, необходимую для работы «умного» здания, как показано в табл. 1.

Полевые исследования дополнительно продемонстрировали, что термоадаптивность в зданиях определяется поведением жильцов, климатическими условиями и пассивными или полупассивными стратегиями регулирования. A.S. Cordero и соавт. представили результаты всестороннего полевого исследования в сельских жилых зданиях, показав, что жильцы демонстрируют широкий диапазон адаптивного комфорта, обусловленный длительным воздействием климатических факторов и корректировкой поведения, при этом нейтральные температуры смещаются в сторону более высоких значений по сравнению со стандартными моделями комфорта [23].

Среди термоадаптивных интеллектуальных материалов фазово-переходные материалы (PCM) представляют собой одну из наиболее эффективных стратегий регулирования теплового микроклимата в помещениях посредством пассивного накопления и отдачи тепла. PCM используют обратимые фазовые переходы «твердое – жидкое» или «твердое – твердое» для поглощения, накопления и отдачи больших количеств скрытой теплоты в узких температурных интервалах, которые совпадают с диапазонами теплового комфорта человека. При интеграции в ограждающие конструкции зданий стены, потолки, полы или фасадные конструкции PCM смягчают колебания температуры в помещении, ослабляя пиковые тепловые нагрузки в дневное время и высвобождая накопленную тепловую энергию в более прохладные периоды [25, 26]. Эта врожденная способность к тепловому буферированию снижает зависимость от механических систем

Табл. 1. Методы оценки неинвазивного термоадаптивного поведения и теплового комфорта

Тип обнаружения	Инструмент обнаружения/ измерения	Модель прогнозирования/ анализа	Термический показатель	Ключевые параметры эффективности	Ссылки
Температура лица и адаптивные меры по тепловому мониторингу/инфракрасный	Бинокулярная инфракрасная камера, YOLOv5, Mediapipe	Random Forest и взвешенное слияние с PMV	TSV (7 классов, 3 класса)	Точность: 82,86 % (7 классов), 94,29 % (3 класса); повышается до 86,8 % (7 классов) и 100 % (3 класса) при обнаружении адаптивных действий	[20]
Температура воздуха в помещении, температура кожи/временные ряды	Датчики климатической камеры, платформа IVE	Декомпозиция временных рядов и регрессия по Δ-особенностям	Тепловое состояние, приемлемость, поведенческие намерения	Выявленные тенденции, временные интервалы между пиками и минимумами, а также продолжительность всплесков как основные факторы, определяющие несоответствие между виртуальной и реальной средами	[21]
Адаптивное поведение жильцов/анкета	Опрос	Иерархическая кластеризация и логистическая регрессия	Термическая приемлемость, %	Интенсивность открывания окон до 87–91 %; в домах с кондиционером приемлемость составила 79 % против 70 % в домах без кондиционеров	[22]
Термоадаптивное поведение/инфракрасное видео	Камеры инфракрасной термографии (IRT)	I3D, модели глубокого обучения SlowFast	Классификация тепловых предпочтений	Точность: 83,53 % (I3D) и 88,56 % (SlowFast) с временем вывода на уровне миллисекунд	[23]
Тепловое адаптивное поведение/беспроводные сигналы	Информация о состоянии канала Wi-Fi (CSI)	2D CNN–LSTM, 2D CNN–GRU	Классификация PTAB	Максимальная точность 86 % (CNN–LSTM); оптимальный размер окна 0,5 с, шаг 0,2 с	[24]

отопления и охлаждения, смягчает пиковый спрос на энергию и повышает стабильность теплового комфорта при суточных и сезонных колебаниях. В отличие от традиционных материалов для накопления явного тепла, PCM обеспечивают высокую плотность накопления энергии без значительного повышения температуры, что делает их особенно подходящими для строительных элементов с ограниченным пространством. Их интеграция в строительные материалы, системы герметизации или композитные слои позволяет встроить тепловую адаптивность непосредственно в конструкцию здания, что позиционирует PCM как критически важную материальную платформу для проектирования зданий с низким энергопотреблением, ориентированных на жильцов и устойчивых к климатическим изменениям [27].

На рис. 2 показана интеграция и механизм работы PCM в ограждающих конструкциях зданий. Слой PCM, встроенный между слоями изоляции, поглощает поступающее тепло от солнечного излучения и теплопроводности в периоды высоких темпера-

тур, аккумулируя энергию за счет фазового перехода из твердого в жидкое состояние и снижая теплопередачу внутрь помещения. В более прохладных условиях накопленное тепло высвобождается по мере повторного затвердевания PCM.

Профиль температуры энтальпии на рис. 2, *b* подчеркивает плато скрытой теплоты, что позволяет накапливать значительное количество энергии в узком диапазоне температур, обеспечивающем комфорт, и обеспечивает эффективную пассивную тепловую буферизацию. Общая тепловая энергия *Q*, накопленная в PCM с температурой плавления *T_m*, К, затем рассчитывается, как указано в уравнении (1):

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mC_{pi}dT + ma_m\Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} mC_{ps}dT,$$

где *T_i* — начальная температура, К; *C_{pi}* — средняя удельная теплоемкость в диапазоне между *T_m* и *T_i*; *a_m* — доля расплавленного материала; *Δh_m* — удельная скрытая теплота плавления; *T_f* — конечная температура, К; *C_{ps}* — средняя удельная теплоемкость в диапазоне между *T_f* и *T_m*.

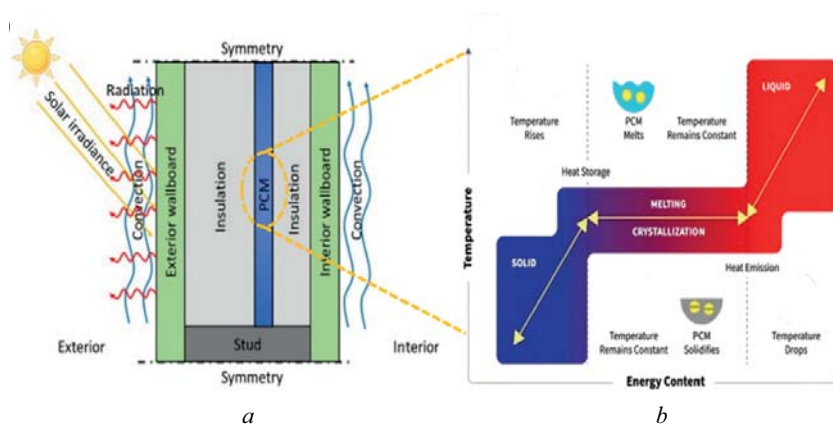


Рис. 2. Внедрение PCM в стену (а), перепечатано с разрешения [27] Elsevier, 2020; принцип работы PCM (b), перепечатано с разрешения [28] Elsevier, 2022

PCM можно встраивать в бетонную кладку или вводить в отделочные слои, такие как гипсовые, штукатурные или цементные покрытия, как правило, посредством микрокапсулирования для обеспечения стабильности и технологичности [28–31]. Такая интеграция на основе покрытий упрощает внедрение, позволяет точно регулировать долю PCM и толщину слоя, а также является выгодной для повышения тепловых характеристик существующих зданий. Кроме того, PCM могут изготавливаться в виде отдельных стеновых панелей, что обеспечивает быструю установку и совместимость с легкими конструктивными системами [32, 33]. Термоадаптивность зданий с использованием фазово-переходных материалов можно условно разделить на четыре взаимодополняющих направления развития: накопление скрытой теплоты на биологической основе, архитектуры PCM со стабилизированной формой или механической гибкостью, соединение PCM с ограждающими конструкциями и гибридизация PCM с использованием солнечной энергии. В рамках биологического подхода M. Zor и соавт. продемонстрировали эвтектические PCM на основе жирных кислот, пропитанные в деревянные шпоны, демонстрирующие температуру плавления $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и емкость накопления скрытой теплоты, достигающую $225,5\text{ Дж/г}$, что свидетельствует о пригодности возобновляемых субстратов в качестве масштабируемых резервуаров скрытой теплоты для низкоуровневого теплового буферирования в зданиях [33]. Что касается механических функциональных систем, то Y. Guo и соавт. разработали фазово-переходный гидрогель, содержащий декагидрат сульфата натрия, достигнув высокой эффективности упаковки PCM в 90,4 % по массе, теплопроводность в диапазоне $0,89\text{--}1,11\text{ Вт м}^{-1}\text{К}^{-1}$, термическое восстановление формы в течение 385 с и прочность на сжатие до 0,67 МПа, продемонстрировав, что интеграция PCM может одновременно решать задачи уменьшения утечек и обеспечения механической прочности [34]. Для использования в ограждающих конструкциях A. Gopalan и соавт. исследовали динамические изоля-

ционные панели с PCM, сообщив о снижении годовой теплоотдачи излучением на 15–72 % и годовых теплопотерь на 7–38 % (в зависимости от климатических условий и ориентации фасада), подчеркнув усиление характеристик PCM за счет совместного проектирования на системном уровне [35]. Расширяя функциональность PCM на системы солнечной энергии, J.M. Mahdi и соавт. провели оценку фотовольтаикотеплового (PVT) коллектора, интегрированного с наномодифицированным PCM, содержащим 5 % объемной концентрации наночастиц, достигнув продолжительности охлаждения фотоэлементов 54–305 мин в течение года, пиковой электрической мощности примерно 52,5 Вт и тепловой мощности до 225 Вт, продемонстрировав потенциал наноусиленных PCM для стабилизации производительности фотоэлектрических систем при одновременном сборе полезной тепловой энергии для зданий [35, 36]. В другом исследовании, проведенном V.V. Upadhyay и соавт., были изучены усовершенствованные TiO_2 парафиновые PCM для систем накопления тепловой энергии за счет скрытой теплоты (LHTES) с использованием 0,5–2,0 мас. % наночастиц [37, 38]. Теплопроводность увеличилась на 35–88 %, ускорив процессы зарядки (накопления тепла) и разрядки (выделения тепла) PCM. При скорости потока теплоносителя $0,01\text{ кг/с}$ PCM с 0,5 % TiO_2 улучшила эффективность зарядки, разрядки и общую эффективность LHTES на 2,89, 5,21 и 2,25 % соответственно по сравнению с чистым парафином.

Помимо использования исключительно накопления скрытой теплоты, тепловая адаптивность также реализована с помощью гибридных систем ограждающих конструкций, которые объединяют пассивную терморегуляцию с очисткой воздуха в помещениях, как показано на рис. 3.

Конфигурация каталитической стены Тромбе объединяет термохромное остекление из гидрогеля с внутренним воздушным каналом, покрытым каталитическим слоем, что позволяет одновременно регулировать солнечное излучение и разлагать загрязняющие вещества. Гидрогель демонстрирует тем-

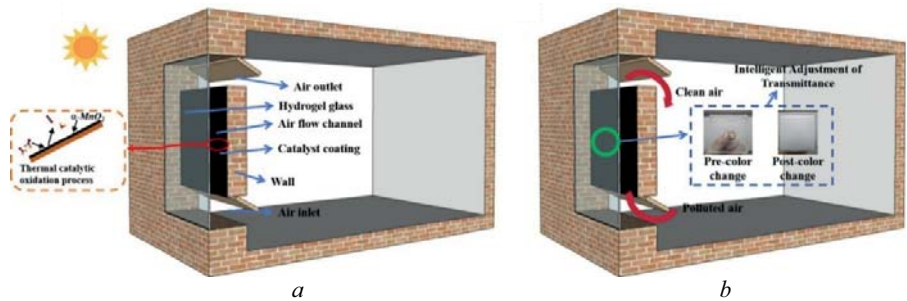


Рис. 3. Схема системы (a); схема работы системы (b). Воспроизведено с разрешения [39] Elsevier, 2025

пературно-зависимое снижение коэффициента пропускания солнечного излучения с 0,9 до 0,3 в диапазоне 20–25 °С, что подавляет чрезмерное поступление солнечного тепла и смягчает перегрев [39]. В результате система снижает температуру поверхности наружной стены на 3,2 °С и температуру воздуха в помещении на 2,5 °С по сравнению с традиционными стенами Тромбе. Одновременно каталитический слой способствует термокаталитическому окислению загрязняющих веществ, достигая эффективности удаления формальдегида 44,6 % в течение 70 мин, тем самым демонстрируя возможность создания многофункциональных ограждающих конструкций зданий, сочетающих термоадаптивность с контролем качества воздуха в помещении.

В дополнение к этому J. Gu и соавт. предложили гибридную систему, интегрированную в крышу, которая сочетает радиационное охлаждение от неба с низкотемпературным каталитическим окислением, как показано на рис. 4, что обеспечивает непрерывное терморегулирование и очистку воздуха в помещении как в дневных, так и в ночных условиях [40].

Система направляет теплый загрязненный воздух из помещения через воздухопровод, покрытый термокатализатором, расположенный под радиационной охлаждающей поверхностью, которая отражает солнечное излучение и одновременно интенсивно излучает в инфракрасном диапазоне. Такая конфигурация способствует одновременному отводу тепла в атмосферу и каталитическому разложению загрязняющих веществ. При летней температуре окружающей сре-

ды 35 °С система обеспечивала снижение температуры внутреннего воздуха относительно наружного до 5 °С и генерировала около 665,29 м³ очищенного воздуха на 1 м² поверхности в течение суток. Полученные результаты подтверждают эффективность совмещения технологий радиационного охлаждения и каталитической очистки воздуха для комплексного управления тепловым режимом и качеством воздушной среды на уровне здания.

Архитектурные механические метаматериалы

Архитектурные механические метаматериалы представляют собой класс передовых систем материалов, в которых макроскопическое механическое поведение определяется, в первую очередь, инженерной геометрией, что обеспечивает беспрецедентный контроль над жесткостью, режимом деформации, поглощением энергии и распространением волн [41]. В отличие от традиционных строительных материалов, свойства которых в значительной степени определяются составом и технологией обработки, механические метаматериалы получают свою многофункциональность за счет специально разработанной архитектуры элементарных ячеек и иерархических структур, что обеспечивает беспрецедентный контроль над жесткостью, соотношением прочности к весу, режимом деформации, распространением волн и рассеиванием энергии [42, 43]. Эта геометрически ориентированная парадигма позволяет материалам демонстрировать свойства, которые трудно достичь в объемных твердых телах, включая отрицательный коэффициент Пуассона, квазиулеву или отрица-

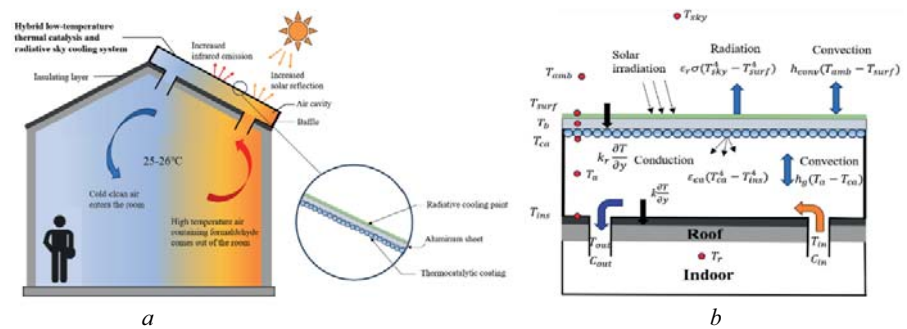


Рис. 4. Схема гибридной системы низкотемпературного термокатализа и радиационного охлаждения небом (a); схема механизма теплопередачи системы (b). Воспроизведено с разрешения [40]. Elsevier, 2024

тельную жесткость, программируемую сжимаемость и адаптированное поведение запрещенной зоны для подавления вибраций и волн [44]. Как показано на рис. 5, архитектурные механические метаматериалы разрабатываются в рамках иерархической структуры проектирования, охватывающей внутренние компоненты материала, геометрию элементарной ячейки, собранные структуры и реализации на уровне устройств, что обеспечивает сверхлегкий вес, сверхвысокую жесткость, отрицательную механическую реакцию и активно перенастраиваемую функциональность, которые актуальны для систем «умных» зданий.

В контексте «умных» и экологически устойчивых зданий архитектурно спроектированные механические метаматериалы открывают революционные возможности для отделения конструктивных характеристик от материальной насыщенности, что позволяет создавать легкие, многофункциональные и адаптивные строительные элементы. Благодаря встраиванию функциональности в геометрию мета-

материалы дают возможность одному конструктивному элементу одновременно выполнять функции несущей конструкции, гашения вибраций, датчика и устройства для сбора энергии. Эта способность актуальна для зданий следующего поколения, где от конструктивных элементов ожидается взаимодействие с киберфизическими системами здания, реагирование на стимулы окружающей среды и активный вклад в обеспечение устойчивости и энергоэффективности, а не просто выполнение роли пассивных опор [46]. В масштабе здания различные классы архитектурных метаматериалов предлагают преимущества для конкретных применений в зависимости от механизмов деформации и геометрической программируемости. Метаматериалы, вдохновленные оригами и характеризующиеся складными и развертываемыми архитектурами, особенно хорошо подходят для адаптивных фасадов, реконфигурируемых устройств затенения и реагирующих ограждающих конструкций, где крупные обратимые трансформации

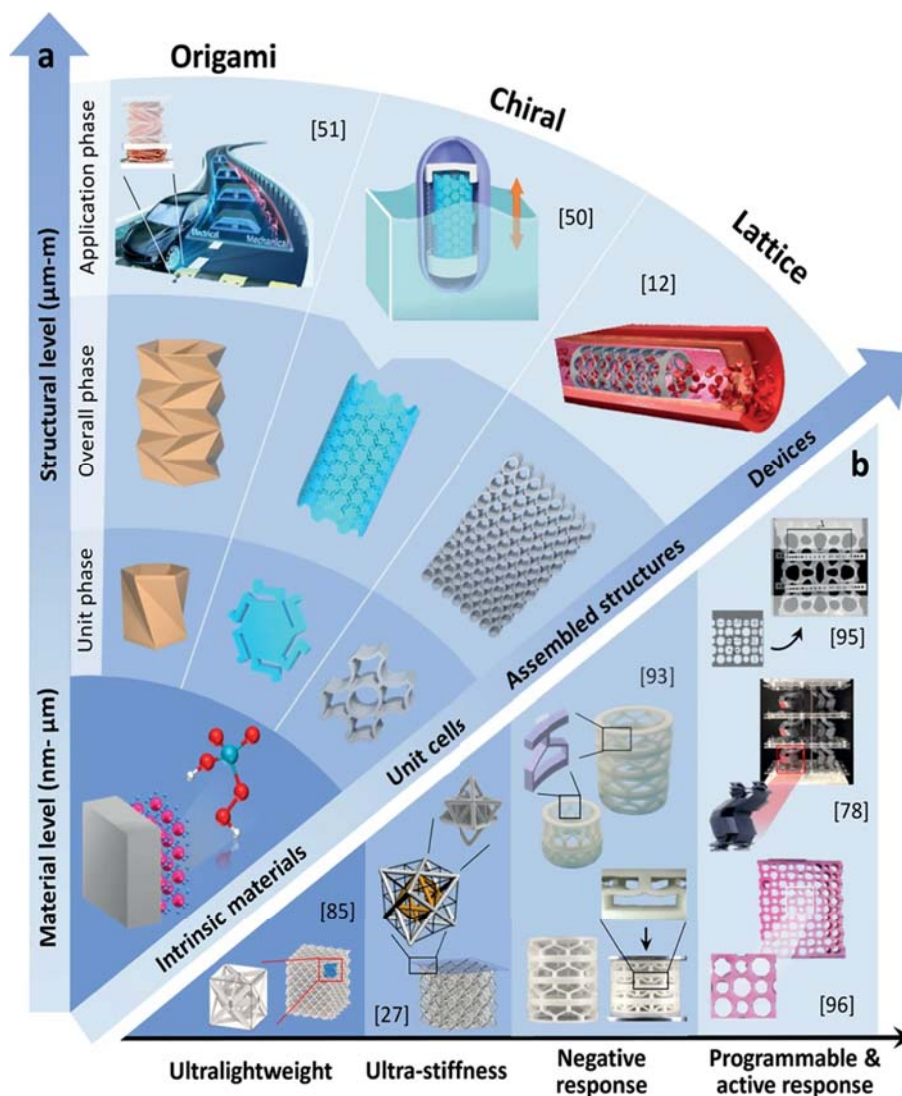


Рис. 5. Категории метаматериалов от уровня материала до уровня конструкции (a); свойства метаматериалов (b). Перепечатано с разрешения [45]. Wiley, 2023

ции формы позволяют динамически регулировать дневное освещение, вентиляцию и теплообмен. Хиральные и ауксетические метаматериалы, демонстрирующие механизмы вращательной деформации и отрицательное поведение коэффициента Пуассона, обеспечивают повышенное сопротивление сдвигу, рассеивание энергии и устойчивость к разрушению, что делает их привлекательными кандидатами для сейсмостойких ядер, ударопрочных стен и виброгасящих конструктивных элементов. Напротив, периодические решетчатые и ячеистые метаматериалы, включая архитектуры октагональных ферм и тройных периодических минимальных поверхностей (TPMS), предлагают исключительно высокое соотношение жесткости к весу и настраиваемые характеристики демпфирования, что позволяет создавать легкие несущие перекрытия, адаптивные плиты, виброизолирующие платформы и многофункциональные конструктивные компоненты [47].

С системной точки зрения архитектурно спроектированные механические метаматериалы могут быть стратегически интегрированы в конструктивные, фундаментные, ограждающие и внутренние подсистемы интеллектуальных зданий. В конструктивных и фундаментных системах периодические и локально резонансные архитектуры метаматериалов позволяют ослаблять низкочастотные колебания и сейсмические волны за счет формирования частотных запрещенных зон, предлагая альтернативу или дополнение к традиционным методам виброизоляции. В отличие от традиционных систем изоляции, которые часто страдают от больших смещений или ограниченной эффективности против вертикального движения, фундаменты из метаматериалов мо-

гут быть спроектированы с учетом доминирующих сейсмических частот, сохраняя при этом несущую способность и структурную целостность [48]. Ярким примером является разработка сейсмических фундаментов из метаматериалов, в которых периодические или локально резонирующие структуры встраиваются под надстройки зданий для ослабления как горизонтальных, так и вертикальных сейсмических волн. Y. Jiang и соавт. экспериментально подтвердили эффективность масштабированного фундамента из метаматериалов (MMF) для многоэтажного здания, как показано на рис. 6, продемонстрировав эффективное ослабление вибраций в режимах сверхнизких частот (<10 Гц) без ущерба для конструктивной устойчивости [49].

Подавление возникало за счет геометрически обусловленных запрещенных зон и эффектов локального резонанса, о чем свидетельствуют характеристики дисперсии, показанные на рис. 6, а не за счет дополнительного демпфирования материала или массы. Несмотря на эту высокую способность к фильтрации вибраций, основа из метаматериала сохраняла достаточную несущую способность и структурную стабильность, тем самым подтверждая практическую осуществимость стратегий сейсмозащиты на базе метаматериалов для реальной гражданской инфраструктуры. В ограждающих конструкциях зданий и внутренних системах архитектурные решетки и ячеистые метаматериалы обеспечивают улучшенную виброизоляцию, акустическое поглощение и ударопрочность, при этом значительно снижая массу конструкции. Такие характеристики особенно выгодны для высотных зданий, сборных плит перекрытий, фасадных элементов и плавающих полов, где вибро-

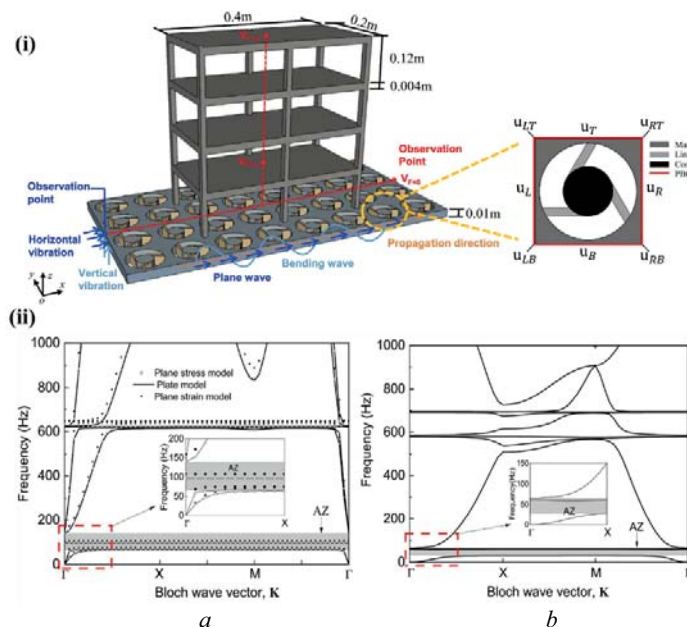


Рис. 6. Модель каркаса MMF при воздействии плоских и изгибных волн с элементарной ячейкой, подверженной периодическим граничным условиям (i); кривые дисперсии (a) плоских волн и (b) изгибных волн (ii). Перепечатано с разрешения [49]. Elsevier, 2025

изоляция и шумоизоляция являются критически важными показателями эксплуатационных характеристик. Кроме того, возможность регулировать жесткость и демпфирование за счет конструкции элементарной ячейки позволяет адаптироваться к изменениям в заполненности здания, условиям нагрузки и воздействиям окружающей среды [42, 50]. J. Shi и соавт. представили систему засыпки из метабетона, включающую локально резонирующие включения в цементной матрице для подавления вибраций, передаваемых по грунту. Результаты экспериментов продемонстрировали значительное ослабление вибраций, вызванных дорожным и железнодорожным движением, в диапазоне 5–30 Гц, что позволило достичь виброизоляции на уровне субволновых размеров, недостижимой при использовании традиционных траншей или свай. Данный подход предлагает масштабируемое решение для чувствительных к вибрациям «умных» зданий, расположенных в густонаселенных городских коридорах [51]. В другом исследовании предлагается концептуальная основа, рассматривающая механические метаматериалы как элемент интеллектуальной гражданской инфраструктуры. Было показано, что цементные композиты и решетчатые структуры со специально спроектированной архитектурой обеспечивают снижение плотности материала на 20–40 % при сохранении прочности на сжатие на уровне, отличающемся не более чем на 10 % от показателей традиционного бетона. При этом удельная прочность превышала $0,08 \text{ МПа} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$, что существенно выше аналогичных характеристик традиционных строительных материалов.

Помимо механических функций, архитектурные метаматериалы также служат платформами для многофункциональной интеграции. Благодаря встраиванию в архитектурные каркасы фаз «умных» материалов, таких как пьезоэлектрические, трибоэлектрические или магниточувствительные элементы, конструктивные компоненты могут выполнять функции распределенных датчиков, приводов и устройств для сбора энергии. Такая интеграция обеспечивает автономный мониторинг состояния конструкций, обратную связь в реальном времени и взаимодействие с системами управления зданиями, усиливая роль метаматериалов в киберфизико-материальных архитектурах зданий [52]. R. Hamzehei и соавт. сообщили о многофункциональных синусоидальных механических метаматериалах, напечатанных на 3D-принтере, которые сочетают виброизоляцию с квазиулеевой жесткостью (QZS) со встроенным сбором энергии, что дает возможность создавать автономные компоненты для интеллектуальных зданий [52]. Решетки были изготовлены из термопластичного полиуретана (TPU) для обратимого изгиба синусоидальных распорок с целью достижения поведения QZS и эффективной виброизоляции при частотах возбуждения выше ~15 Гц, где коэффициент передачи опускался ниже единицы. Пьезоэлектрический биморфный привод, расположенный в областях решет-

ки с высокой деформацией, генерировал пиковое напряжение ~3 В и плотности мощности 600–700 мкВт/г при 15 Гц. Кроме того, накладки из титаната цирконата свинца (PZT), установленные на полусотовую опору, генерировали ~500 мВ с плотностью мощности, приближающейся к 800 мкВт/г при ~90 Гц, что достаточно для питания низкоэнергетических беспроводных датчиков, демонстрируя возможность самоподдерживающейся виброизоляции и мониторинга состояния конструкций в интеллектуальных зданиях следующего поколения. На уровне материальных систем K. Baggi и соавт. разработали бетон из метаматериалов со встроенными наногенераторами, встраивая ауксетические полимерные решетки в проводящую цементную матрицу [53]. Полученные композиты достигали до 15 % обратимой сжимаемости при циклической нагрузке, обеспечивая при этом пиковую выходную электрическую мощность около 330 мкВт, что позволяет одновременно нести нагрузку, собирать энергию и осуществлять автономное зондирование. Эти классы материалов, основанные на геометрии, предоставляют возможность рационально адаптировать механические характеристики в архитектурных масштабах, способствуя интеграции адаптивности, устойчивости и многофункциональности в интеллектуальные и экологически устойчивые строительные системы нового поколения.

Композиты для сбора энергии и интеллектуальные функциональные композиты

Функциональные композиты, собирающие энергию, становятся важнейшей платформой материалов для зданий с нулевым энергопотреблением и устойчивых к климатическим изменениям, поскольку они преобразуют повсеместные возбуждения здания, такие как вибрации окружающей среды, циклические эксплуатационные нагрузки, шаги, колебания, вызванные фасадом или ветром, и тепловые градиенты, в полезную электрическую энергию, одновременно обеспечивая автономное зондирование и структурную интеллектуальность [54–56]. В отличие от традиционных систем возобновляемой энергии, таких как фотоэлектрические панели на крышах или внешние накопители энергии, эти материальные системы встраивают механизмы преобразования энергии непосредственно в конструкцию здания, обеспечивая распределенное, децентрализованное и не требующее обслуживания производство электроэнергии при сохранении структурной целостности [57]. Этот сдвиг парадигмы превращает здания из пассивных потребителей энергии в активные инфраструктуры, способные собирать механические, тепловые и экологические стимулы окружающей среды, присущие застроенной среде [58].

Как показано на рис. 7, композитные материалы с функциями сбора энергии и интеллектуальными свойствами могут быть стратегически интегрированы в полы, фундаменты, стены, фасады и кровельные системы, где они собирают механическую и тепло-

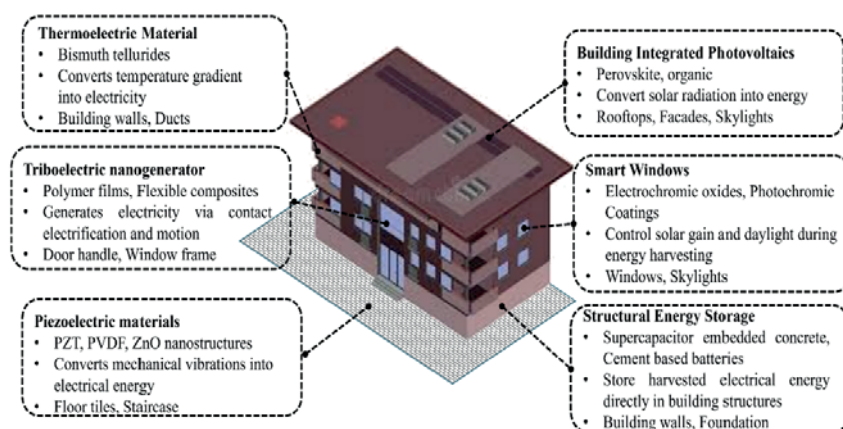


Рис. 7. Интеграция интеллектуальных материалов в различные компоненты здания

вую энергию, генерируемую в ходе повседневной эксплуатации здания [59]. Генерируемая локально электрическая энергия используется для питания распределенных сенсорных узлов, предназначенных для мониторинга состояния конструкций, отслеживания вибраций, определения присутствия людей и измерения параметров окружающей среды, что обеспечивает непрерывный сбор данных без необходимости подключения к внешней энергетической инфраструктуре. В сочетании с проводящими или самочувствующими композитными матрицами эти системы дополнительно поддерживают обнаружение в реальном времени изменения деформации, зарождения трещин и накопления повреждений [60]. Эта децентрализованная, встроенная в материал архитектура энергообеспечения и сенсоров превращает здание из пассивного потребителя энергии в энергоактивную, богатую информацией систему, способную к прогнозируемому техническому обслуживанию, адаптивному реагированию и повышенной эксплуатационной устойчивости. Такая интеллектуальная система, ориентированная на материалы, подчеркивает ключевую роль функциональных композитов с функцией сбора энергии в экологических зданиях нового поколения, где экологичность, долговечность и интеллектуальная функциональность проектируются совместно на уровне материалов. В исследовании Н.В. Virgin и соавт. был изучен экокземляной цементный композит, армированный углеродными микроволокнами, интегрирующий функцию измерения деформации в экологичные строительные материалы [60]. Благодаря частичной замене цемента и введению углеродных микроволокон вблизи порога электрической перколяции (0,025–0,25 % по массе) композит достиг коэффициентов усиления, превышающих 100, сохранив при этом достаточную механическую целостность для применения в несущих конструкциях и малоэтажном строительстве, что подчеркивает многофункциональность, заложенную на уровне материала, снижая воздействие на окружающую среду и обеспечивая мониторинг конструкции в режиме реального времени.

Кроме того, в исследовании М. Ergün и соавт. выполнено численное моделирование «умного» здания из железобетона (ж.б.) с использованием метода конечных элементов (МКЭ) и размещением пьезоэлектрических датчиков, при этом численная модель была проверена с помощью соответствующей экспериментальной установки, как показано на рис. 8 [61].

Конструкция подвергалась реалистичным эксплуатационным нагрузкам, представляющим жильцов и мебель, а также сейсмическим воздействиям, приложенным в вертикальном направлении для моделирования колебаний, вызванных землетрясением. Экспериментально измеренные вибрационные реакции показали хорошее согласие с прогнозами МК для начального смещения 18 мм, что свидетельствует о точном отражении динамических характеристик системы. Аналогичное соответствие наблюдалось при более высоком начальном смещении 28 мм, что подтверждает надежность численной модели в прогнозировании вибрационного поведения и реакций, значимых для сбора энергии, при различных интенсивностях возбуждения.

В исследовании W. Thongthapthai и соавт. был разработан трибоэлектрический наногенератор на основе портландцемента (PC) и натурального каучука (NR) (PC/NR-SL-T TENG), предназначенный для использования в качестве «умного энергетического пола» с целью улавливания биомеханических колебаний (ходьба, бег, вибрации, вызванные скоплением людей) [62]. В диапазоне 1–10 Гц пиковое напряжение (V_{pp}) увеличилось с 46 В (1 Гц) до 242 В (10 Гц), что свидетельствует о сильном частотно-зависимом усилении, связанном с реальными спектрами возбуждения окружающей среды в застроенных средах. Плотность мощности достигала 3,27 Вт/м² при нагрузке 5 Н и частоте 5 Гц, что примерно в 11 раз превышает показатели стандартного TENG на основе поликарбоната (0,29 Вт/м²). Пол дополнительно усиливается конденсатором, способным заряжаться (10–47 мкФ) при нагрузке 5 Н и частоте 5 Гц через выпрямительную схему, что указывает на возможность использования стратегий прерывистого пита-

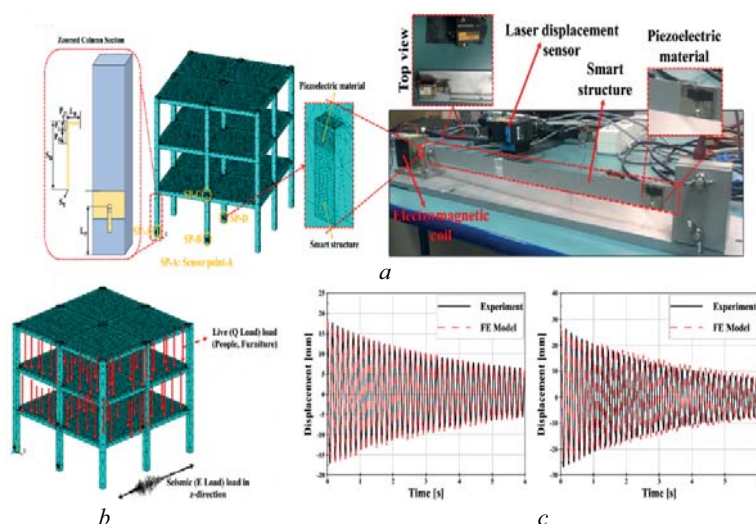


Рис. 8. МК-модель и расположение датчиков в «умном» здании из ж.б., а также экспериментальная установка (а); постоянные и сейсмические нагрузки (б); экспериментальные и расчетные колебательные реакции при $a = 18$ мм и $b = 28$ мм соответственно (с). Перепечатано с разрешения [62]. Springer, 2025

ния или буферизации в автономных сенсорных узлах. В аналогичном исследовании Р. Не и соавт. решили проблему давней чувствительности к влаге трибоэлектрических систем на основе древесины, разработав полностью деревянный TENG (AW-TENG) с применением обработанной древесины в качестве фрикционного слоя и спрессованной карбонизированной древесины в качестве электрода, тем самым повысив гидрофобность и проводимость за счет обработки [63, 64]. В условиях высокой влажности (80 % относительной влажности) оптимизированный AW-TENG достиг напряжения холостого хода $V_{oc} = 50,85$ В и тока короткого замыкания $I_{sc} = 0,72$ мкА. В отличие от цементных TENG-полов, подход AW-TENG использует технологии переработки биомассы и карбонизацию деревянных электродов, обеспечивая экологическую устойчивость. Кроме того, Е. Keel и соавт. сообщили о разработке высокоэффективного трибоэлектрического наногенератора (TENG) на основе трехмерной графеновой пены (3DG)/ПЭТ (PET). Поверхность графена характеризовалась гидрофобным углом смачивания $138,52^\circ$ и шероховатостью поверхности $2,4 \pm 0,5$ мкм, что способствовало повышению генерации электрического заряда и снижению межфазной адгезии. Устройство на основе 3DG обеспечивало напряжение холостого хода 400 В, ток короткого замыкания 105,7 мкА и удельную выходную мощность $10\,372$ мВт/м² при частоте 3 Гц и сопротивлении нагрузки 40 МОм.

В дополнение к сбору энергии на полу были исследованы трибоэлектрические системы, интегрированные в крышу, для улавливания механической энергии, вызванной дождем. В исследовании Q. Dai и соавт. оценен сборщик энергии капель (DEN) на крышах с различными углами наклона и архитектурной геометрией [54]. Для наклонных крыш мгновенная пиковая мощность на каплю резко снижалась

с увеличением угла наклона: с 81,6 мкВт при 100° до 0,42 мкВт при 180° , что подчеркивает роль динамики удара и скользящего поведения. Для различных морфологий крыш DEN генерировал 12,14 мкВт на классической крыше, 146,6 мкВт на куполообразной крыше и 86,3 мкВт на крыше башенного типа, что демонстрирует, что архитектурная кривизна значительно влияет на эффективность сбора энергии. В условиях моделируемого дождя конденсатор емкостью 4,7 мкФ заряжался до 1,0, 0,4 и 0,2 В при расходе 9, 45 и 64 мл/с соответственно. В табл. 2 приведено сравнение TENG на основе различных материалов в качестве трибоэлектрического слоя.

Кроме того, интеллектуальные цементные композиты на основе нитей, включающие в себя трибоэлектрические нити с плетеной сердцевинкой и оболочкой, встроенные непосредственно в портландцемент, продемонстрировали возможность одновременного достижения структурного усиления, сбора механической энергии и автономного зондирования [74]. Благодаря контролируемой модификации морфологии поверхности нитей трибоэлектрическое выходное напряжение увеличено более чем на 120 %, а при полномасштабном внедрении в дорожное покрытие в сочетании с беспроводной передачей данных и алгоритмами глубокого обучения была достигнута 100%-ная точность классификации транспортных средств, определения скорости и распознавания пешеходов. В дополнение к цементу, армированному нитями, проводящие композиты на цементной основе, содержащие углеродные наполнители, близкие к порогу электрической перколяции, позволяют цементу функционировать в качестве структурного энергетического материала. Эти системы поддерживают трибоэлектрический сбор энергии от ветра и биомеханического движения, приводящегося в действие контактной электризацией, одновременно функцио-

Табл. 2. Сравнение TENG на основе различных материалов в качестве трибоэлектрического слоя

Материалы		Свойства			Ссылки
Электроотрицательные	Электроположительные	Напряжение холостого хода V_{oc} , В	Ток короткого замыкания I_{sc} , мкА	Плотность выходной мощности P_{out} , мВт/м ²	
Полиимид	Лазерный индуцированный графен	3500	60	2361	[65]
Графит	Скомканный графен	15	–	15	[66]
Полидиметилсилоксан PDMS	Углеродные нанотрубки CNT	383	25	8000	[67]
Полиэтилентерефталат	Пленки из шелкового фиброина	213,9	0,34	68	[68]
PDMS	Графен, полученный методом сдвигового отслаивания	233	0,731	131,4	[69]
Полиэтилентерефталат	3D-графен	400	105,7	10 372	[70]
Полимолочная кислота PLA	Желатин	500	16	5000	[71]
Нитроцеллюлозная бумага	Бумага для взвешивания	360	250	–	[72]
Поливинилиденфторид (PVDF), наполненный углеродным наполнителем	Нейлон-6	1,4	6	19,7	[73]

нируя в качестве структурных конденсаторов, способных к локальному накоплению энергии. Y. Yuan и соавт. исследовали геополимерные термоэлектрические композиты в качестве энергетических материалов, встроенных в инфраструктуру зданий [74]. Введение электропроводящих наполнителей позволило обеспечить коэффициент Зеебека до 1092 мкВ/К при температуре 293 К и максимальный коэффициент

мощности 0,84 мкВт·м⁻¹·К⁻², при этом прочность геополимера на сжатие сохранялась на уровне 33,4 МПа. В исследовании Y. Ra и соавт. изучили трибоэлектрический наногенератор на основе цементного проводящего композита (CBC-TENG), встроенный в здание с нулевым энергопотреблением, как показано на рис. 9, где представлены режимы сбора энергии: на стенах (ветер), на полу (движение человека) и на крыше

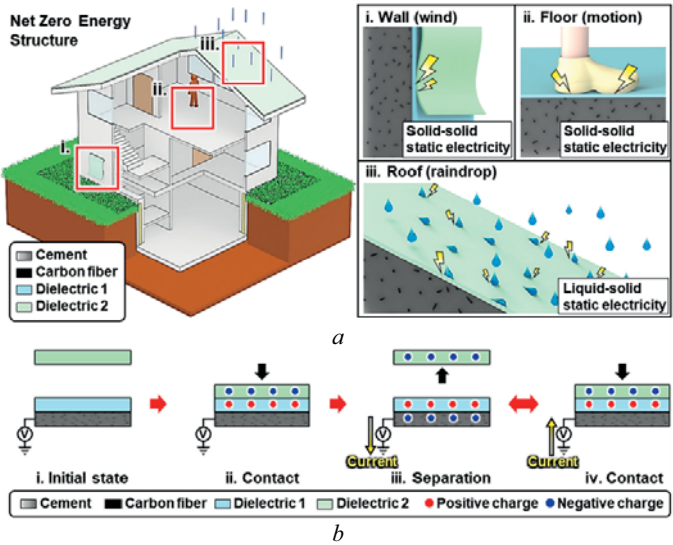


Рис. 9. Концептуальная схема жилой системы с нулевым энергопотреблением, иллюстрирующая интеграцию структурных компонентов на основе CBC, способных собирать энергию из нескольких возобновляемых источников окружающей среды, включая (i) энергию ветра, (ii) биомеханическую энергию, генерируемую человеческой деятельностью, и (iii) энергию капель дождя (a); схематическое изображение механизма сбора энергии, основанного на контактной электризации, реализованного благодаря использованию CBC (b). Перепечатано с разрешения [12]. Elsevier, 2021

(капли дождя) [12]. Настенные CBC-TENG под воздействием ветра генерировали непрерывное выпрямленное выходное напряжение ~ 5 В, тогда как CBC-TENG, встроенные в пол, собирали биомеханическую энергию посредством контакта «твердое – твердое» при повторяющихся шагах, производя стабильные переменные выходные сигналы после выпрямления. Установленные на крыше CBC-TENG, работающие за счет контактной электризации жидкость – твердое тело, генерировали напряжение от капель деионизированной воды при частоте 1 Гц и угле наклона крыши 65° , причем выходное напряжение систематически увеличивалось с ростом частоты капель. Помимо цементных материалов, С. Prouskas и соавт. предложили U-образную архитектуру сенсibilизированного красителем солнечного элемента (DSSC) со светоулавливающей конструкцией, предназначенную для эксплуатации в наружных условиях [75]. Геометрия перераспределяет падающий солнечный свет на вертикально установленные DSSC посредством внутреннего отражения, эффективно снижая локальную интенсивность излучения и ограничивая фотодegradацию. Такая конфигурация позволила увеличить коэффициент заполнения до $\sim 96\%$ при наружном освещении, сохранив при этом выработку электроэнергии, сопоставимую с традиционными DSSC с вертикальным освещением. Помимо фотоэлектрических оболочек, М. Fu и соавт. разработали термотропные ионные гидрогелевые «умные» окна, сочетающие адаптивную солнечную регулировку с термоэлектрическим сбором энергии [76]. Гидрогель демонстрировал обратимый фазовый переход около 26°C , обеспечивая высокую светопропускаемость ($>90\%$) ниже температуры перехода и сильную солнечную модуляцию ($\sim 80\%$) выше нее. Одновременно ионный транспорт, вызванный температурным градиентом, генерировал выраженный термоэлектрический отклик с коэффициентом Зеебека $39,03$ мВ/К, коэффициентом мощности $0,838$ мВт/м²/К и плотностью энергии до 250 мДж/м², демонстрируя многофункциональные оконные элементы для «умных» зданий.

Перспективы

Развитие технологий экологичного и интеллектуального строительства требует перехода от однофункциональных строительных материалов к, по сути, многофункциональным, адаптивным, инженерным системам материалов, способным поддерживать рабочие характеристики в суровых условиях. Разработка гибридных интеллектуальных материалов, интегрирующих терморегуляцию, механическую устойчивость, самодиагностику и преобразование энергии в рамках единой материальной структуры, позволила бы снизить сложность межфазных взаимодействий и усилить функциональную синергию. Такие материалы требуют передовых композитных архитектур, в которых фазы накопления скрытой теплоты, проводящие сети и полимеры, реагирующие на стимулы, сосуществуют без неблаго-

приятных эффектов перекрестного взаимодействия. Кроме того, разработка химических составов материалов, устойчивых к усталости и самостабилизирующихся, использующих динамические ковалентные связи, супрамолекулярные взаимодействия или механизмы обратимого сшивания, имеет решающее значение для поддержания функциональной целостности при длительных циклических тепловых и механических нагрузках. Архитектурно-проектируемые механические метаматериалы должны развиваться в направлении систем с программируемой геометрией, способных к адаптивной модуляции жесткости, гашению вибраций и реконфигурируемому рассеиванию энергии посредством фазовых переходов материала или нестабильностей, вызванных напряжением. Кроме того, критически важно появление энергоактивных конструкционных материалов, в которых цементные, полимерные или биопроизводные матрицы, в которые встроены трибоэлектрические, пьезоэлектрические или термоэлектрические фазы, функционируют одновременно как несущие компоненты и устройства сбора распределенной энергии. Интеллектуальные материалы также должны обладать устойчивостью к воздействию окружающей среды, сохраняя стабильные функциональные характеристики в условиях влажности, ультрафиолетового излучения и экстремальных температур благодаря стратегиям герметизации и инженерии поверхностей. Материалы должны представлять собой биоинспирированные и спроектированные с учетом жизненного цикла системы, сочетающие иерархический дизайн, встроенную способность к самодиагностике и возможность вторичной переработки, что позволит зданиям превратиться в энергоактивные, информационно насыщенные и устойчивые инфраструктуры, а не в пассивные конструктивные узлы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

«Умные» и экологичные здания стали центральным компонентом глобальных стратегий, направленных на смягчение последствий изменения климата, сокращение потребления ресурсов, а также повышение устойчивости и комфорта жилой среды. По мере того как здания превращаются из статичных потребителей энергии в адаптивные и ориентированные на эффективность системы, передовые материалы играют решающую роль в обеспечении этой трансформации.

Рассмотрены интеллектуальные и многофункциональные материалы нового поколения, способствующие созданию «умных», низкоуглеродных и устойчивых к климатическим изменениям зданий. Материальные системы, такие как архитектурно-механические метаматериалы и функциональные композиты, собирающие энергию, демонстрируют основные функции здания, включая терморегуляцию, гашение вибраций, преобразование энергии, сенсорные измерения и адаптивную реакцию, которые могут быть неотъемлемой частью конструктивных элементов и элементов

ограждающих конструкций. Благодаря использованию состава материалов, микроструктурного проектирования и поведения, определяемого геометрией, эти системы позволяют функциональности возникать непосредственно из материала, а не через внешние подсистемы. Растущая интеграция реагирующих и самочувствующих материалов еще больше укрепляет эту парадигму, обеспечивая распознавание состояния, функциональную адаптивность и стабильность характеристик в условиях динамически меняющейся окружающей среды

и заполняемости. Постоянный прогресс в области проектирования и характеристик материалов повышает надежность и способствует соответствию требованиям на уровне всего здания. Эти разработки позиционируют интеллектуальные материалы как ключевые факторы, позволяющие строить здания в виде адаптивных, энергоактивных и интеллектуальных систем, способных внести значимый вклад в долгосрочную устойчивость, климатическую устойчивость и ориентированность на человека.

Поступила в редакцию 9 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 19 января 2026 г.

Одобрена для публикации 29 января 2026 г.

ОБ АВТОРЕ: Баласубраманиан Кандасубраманиан — лаборатория аддитивного производства, кафедра металлургии и материаловедения; Оборонный институт передовых технологий; 411025, г. Пуна, Гиринангар, штат Махараштра, Индия; meetkbs@gmail.com.

INTRODUCTION

The global imperative to decarbonize human activity and strengthen climate resilience has positioned the construction sector as a pivotal domain for technological intervention and sustainable reform. The accelerated urbanisation, escalating operational energy demands, and the disproportionate environmental burden associated with conventional construction workflows collectively underscore the urgency of reconfiguring material design paradigms within the built-environment sector [1]. The contemporary construction practices account for substantial fractions of global anthropogenic CO₂ emissions, resource extraction, and solid-waste generation, thereby necessitating the deployment of innovative solutions grounded in advanced materials science [2]. Recent global assessments further underscore this urgency, according to the 2024/2025 UNEP GlobalABC Global Status Report, the buildings and construction sector contributes approximately 34–37 % of total global energy-related CO₂ emissions, making it the single largest sectoral contributor to climate change [3]. These emissions encompass not only operational carbon arising from heating, cooling, ventilation, lighting, and appliance use, but also embodied carbon embedded within material extraction, cement and steel production, transportation, and on-site construction activities. The embodied carbon component is increasingly recognized as a dominant contributor over full life cycle of high-performance buildings, as operational efficiencies improve through insulation, electrification, and renewable integration [4, 5].

This growing carbon liability situates material innovation as a central mechanism through which the construction sector can meet national and international decarbonization mandates including the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDGs 7 (Affordable and Clean Energy), 9 (Industry,

Innovation, and Infrastructure), 11 (Sustainable Cities and Communities), 12 (Sustainable Consumption and Production), and 13 (Action to Combat Climate change and its Impacts), each of which identifies clean energy, sustainable cities, and responsible material use as core developmental priorities [6]. In this context, the development, characterisation, and large-scale integration of next-generation materials for green-building manufacturing constitute a strategically significant pathway toward achieving low-carbon, resource-efficient, and climate-adaptive infrastructure. Advanced material systems when designed to deliver multifunctionality, durability, and intrinsic responsiveness, offer opportunities to decouple structural performance from material intensity, reduce maintenance-driven emissions, and embed energy and sensing functionalities directly within the building fabric [7, 8]. Fig. 1 provides a schematic overview of the major classes of materials currently being advanced for green and smart buildings, illustrating how bio-based, recycled, hybrid, and smart functional materials collectively support low-carbon and multifunctional building design.

Within this emerging smart-building paradigm, materials assume a foundational role by serving simultaneously as load-bearing elements, functional interfaces, and active transducers of energy and information. Unlike conventional construction materials, next-generation material systems are engineered to exhibit intrinsic responsiveness to thermal, mechanical, electrical, and environmental stimuli, enabling building components to sense, adapt, and respond without reliance on external devices [9, 10]. This material-centricity is achieved through the development of smart and multifunctional materials that integrate thermal regulation, energy harvesting, sensing, and actuation capabilities directly within the building fabric.

Beyond the classical sustainability discourse centred on embodied-carbon reduction and resource efficien-

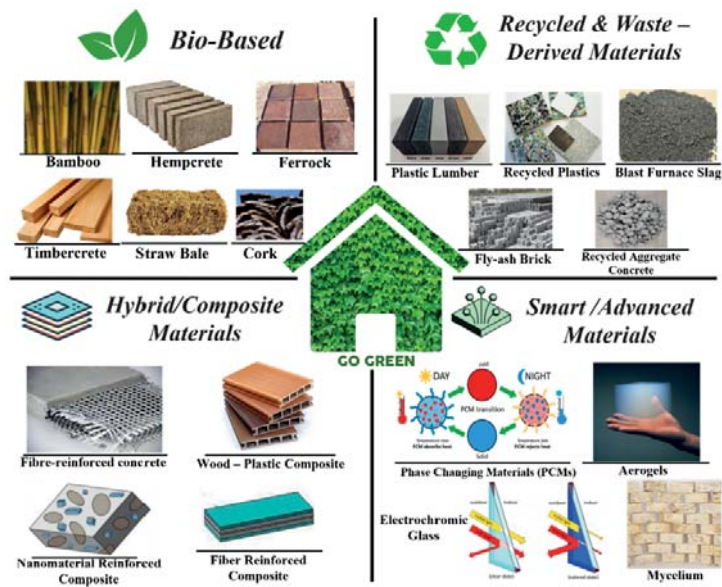


Fig. 1. Sustainable Materials used for construction of Green Buildings

cy, the conceptualisation of “smart buildings” introduces a multifaceted framework wherein materials are not merely passive structural entities but active participants in environmental interaction, energy modulation, and autonomous adaptation [11]. The contemporary smart-building definitions emphasise a coupled cyber-physical-material architecture in which structural components exhibit thermophysical adaptivity, decentralised energy transduction, real-time sensing, damage detection, and autonomic functional reconfiguration. These capabilities derive not from mechanical or electrical subsystems alone but increasingly from the intrinsic functionalities embedded within advanced material systems. The transition from passive to intelligent material fabrics represents a critical frontier in achieving high-performance, net-zero and climate-resilient building technologies [12]. This paradigm shift transcends conventional construction by embedding multifunctional materials and responsive components that interact synergistically with building management systems (BMS), thereby enabling dynamic control over thermal, lighting, structural, and air quality parameters [13].

MATERIALS AND METHODS

In this context, this review paper discusses the next-generation smart and multifunctional materials as enablers of green, smart, and climate-resilient buildings. The review examines key material classes including thermal-adaptive materials, architected mechanical metamaterials, and energy-harvesting functional composites with emphasis on material composition, microstructural design, and geometry-governed behaviour enabling thermal regulation, mechanical adaptability, energy transduction, and self-sensing within structural and envelope components. It also discusses how intrinsic material functionalities such as thermophysical adaptivity, energy transduction, self-sensing can be embedded directly

within structural and envelope components, thereby reducing dependence on auxiliary mechanical or electrical subsystems.

RESEARCH RESULTS

Smart and Multifunctional Materials for Sustainable Buildings

Thermal-Adaptive Smart Materials

Thermal-adaptive smart materials constitute a core functional class in smart and sustainable buildings by enabling dynamic regulation of heat transfer, solar gain, and thermal storage in response to environmental stimuli. These materials operate by reversibly modifying their thermophysical or optical properties such as thermal conductivity, heat capacity, infrared emissivity, or solar transmittance under variations in temperature, solar irradiation, or ambient conditions. Unlike conventional passive insulation systems, thermal-adaptive materials actively interact with diurnal and seasonal thermal cycles, allowing building envelopes, facades, and interior components to modulate heat flow in real time [14]. This adaptive behaviour contributes to reductions in heating and cooling loads, peak energy demand, and occupant thermal discomfort, thereby supporting low-energy and climate-resilient building operation. The integration of such materials into walls, glazing systems, roofs, and hybrid envelope assemblies enables thermal functionality to be embedded intrinsically within the building fabric, reducing reliance on mechanical systems while enhancing long-term operational efficiency and resilience.

Thermal adaptivity is increasingly extended beyond intrinsic material response through the integration of non-intrusive, data-driven recognition of human thermal adaptation into building thermal regulation strategies. W. Duan et al. demonstrated that occupants’ thermal-adaptive behaviours can be inferred in real time using vision-based

cross-modal knowledge-distillation frameworks, enabling accurate behavioural recognition with reduced computational complexity and facilitating lightweight deployment for intelligent heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) control [15]. This study demonstrates that behavioural cues can serve as reliable control signals for dynamically adjusting indoor thermal environments without invasive sensing. Complementing this approach, Y. Bai et al. developed an infrared spatiotemporal modelling framework identifying eleven representative thermal-adaptive behaviours, achieving recognition accuracies up to 95.89 % and thermal sensation prediction accuracies of 96.24 %, while maintaining robustness under variable lighting and preserving occupant privacy [16]. The study employed controlled thermal conditions of 22–25, 25–27 and 27–30 °C, with participants seated quietly for 20 min to allow thermal acclimatization prior to data acquisition and video recordings were acquired simultaneously from five viewing angles to ensure comprehensive capture of thermal-adaptive behaviours [17]. Extending thermal adaptivity to outdoor environments, H. Li et al. combined infrared thermography with behavioural monitoring to quantify relationships between pedestrian skin temperature, physiological equivalent temperature (PET), and adaptive responses, revealing stabilization of skin temperature at PET values of approximately 40–46 °C depending on activity type and identifying shading-related behaviours

as the most effective mitigation strategies under extreme heat stress [18]. Further, Li et al. demonstrated that thermal adaptivity can also be engineered at the microstructural level through photonic metal–organic frameworks exhibiting thermally enhanced luminescence, ultra-high light yield (~49,700 photons MeV⁻¹), and stability exceeding 95 % after prolonged thermal and radiation exposure [19]. Whilst microstructural engineering enables intrinsic thermal adaptivity, non-invasive thermal adaptive behavior and comfort assessment provides the system-level feedback required for smart building operation, as summarized in Table 1.

The field-based investigations further demonstrated that thermal adaptivity in buildings is governed by occupant behavior, climatic context, and passive or semi-passive control strategies. A.S. Cordero et al. reported a comprehensive field study in rural residential buildings, showing that occupants exhibit wide adaptive comfort ranges driven by long-term climatic exposure and behavioral adjustment, with neutral temperatures shifting toward higher values compared to standard comfort models [24].

Among thermal-adaptive smart materials, phase change materials (PCMs) represent one of the most effective strategies for regulating indoor thermal environments through passive heat storage and release. PCMs utilize reversible solid–liquid or solid–solid phase transi-

Table 1. Non-invasive thermal adaptive behavior and thermal comfort assessment methods

Detection Type	Detection/Sensing Tool	Prediction/Analysis Model	Thermal Metric	Key Performance Parameters	References
Facial temperature and thermal adaptive actions/infrared	Binocular infrared camera, YOLOv5, Mediapipe	Random Forest and weighted fusion with PMV	TSV (7-class, 3-class)	Accuracy: 82.86 % (7-class), 94.29 % (3-class); improved to 86.8 % (7-class) and 100 % (3-class) when adaptive actions detected	[20]
Indoor air temperature, skin temperature/ time-series	Climate chamber sensors, IVE platform	Time-series decomposition and regression on Δ-features	Thermal state, acceptability, behavioral intention	Identified trend, peak–trough timing, burst duration as dominant factors governing mismatch between IVE and real environments	[21]
Occupants’ adaptive behavior/questionnaire	Survey	Hierarchical clustering and logistic regression	Thermal acceptability, %	Window opening intensity up to 87–91 %; AC residences showed 79 % acceptability vs 70 % for NV residences	[22]
Thermal adaptive behavior/infrared video	Infrared thermography (IRT) cameras	I3D, SlowFast deep learning models	Thermal preference classification	Accuracy: 83.53 % (I3D) and 88.56 % (SlowFast) with millisecond-level inference time	[23]
Thermal adaptive behavior/wireless signals	Wi-Fi Channel State Information (CSI)	2D CNN–LSTM, 2D CNN–GRU	PTAB classification	Maximum accuracy 86 % (CNN–LSTM); optimal window size 0.5 s, step size 0.2 s	[24]

tions to absorb, store, and release large amounts of latent heat over narrow temperature intervals that coincide with human thermal comfort ranges. When integrated into building envelopes, walls, ceilings, floors, or facade assemblies, PCMs moderate indoor temperature fluctuations by attenuating peak heat gains during daytime and releasing stored thermal energy during cooler periods [25, 26]. This intrinsic thermal buffering capability reduces reliance on mechanical heating and cooling systems, mitigates peak energy demand, and enhances thermal comfort stability under diurnal and seasonal variations. Unlike conventional sensible heat storage materials, PCMs enable high energy storage density without significant temperature rise, making them particularly suitable for space-constrained building components. Their integration within construction materials, encapsulation systems, or composite layers allows thermal adaptivity to be embedded directly into the building fabric, positioning PCMs as critical materials platform for low-energy, occupant-centric, and climate-resilient building design [27].

The Fig. 2 illustrates the integration and operating mechanism of PCMs within building envelopes. The PCM layer embedded between insulation absorbs incoming heat from solar radiation and conduction during high-temperature periods, storing energy through a solid-liquid phase transition and reducing heat transfer to the interior. During cooler conditions, the stored heat is released as the PCM resolidifies.

The enthalpy temperature profile in Fig. 2, *b* highlights the latent heat plateau, enabling significant energy storage within a narrow comfort-relevant temperature range and providing effective passive thermal buffering. The total thermal energy Q stored in a PCM of melting point T_m , K is then calculated as mentioned in eq:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mC_{pi}dT + ma_m\Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} mC_{ps}dT,$$

where in T_i is the initial temperature, K; C_{pi} is the average specific heat between T_m and T_i , T_f is the final temperature, K; C_{ps} is the average specific heat between T_f and T_m , and a_m is a fraction of the melted material.

PCMs can be embedded within concrete masonry or dispersed into finishing layers such as gypsum, plaster, or cement-based coatings, typically through microencapsulation to ensure stability and processability [28–31]. Such coating-based integration facilitates ease implementing, allows accurate regulation of PCM loading and layer thickness, and is advantageous for upgrading the thermal performance of existing buildings. In addition, PCMs can be manufactured as standalone wallboard elements, offering rapid installation and compatibility with lightweight structural systems [32, 33]. Building-scale thermal adaptivity using phase change materials can be broadly categorized into four complementary development pathways: bio-based latent heat storage, shape-stabilized or mechanically flexible PCM architectures, PCM–envelope system coupling, and solar-assisted PCM hybridization. Within the bio-based approach, M. Zor et al. demonstrated eutectic fatty-acid PCMs impregnated into wood veneers, exhibiting melting temperatures of 30 °C and latent heat storage capacities reaching 225.5 Jg⁻¹, exhibiting the suitability of renewable substrates as scalable latent heat reservoirs for low-grade thermal buffering in buildings [33]. With respect to mechanical functional systems, Y. Guo et al. developed a phase-change hydrogel incorporating sodium sulfate decahydrate, achieving a high PCM packaging efficiency of 90.4 wt. %, thermal conductivity in the range of 0.89–1.11 Wm⁻¹K⁻¹, thermally induced shape recovery within 385s, and compressive strength up to 0.67 MPa, demonstrating that PCM integration can simultaneously address leakage mitigation and mechanical robustness [34]. For using in envelopes, A. Gopalan et al. investigated PCM-assisted dynamic insulation panels, reporting 15–72 % reductions in annual radiant heat transfer and 7–38 % reductions in yearly heat loss (depending on climatic conditions and facade orientation) highlighting the amplification of PCM performance through system-level co-design (35). Extending PCM functionality to solar-energy systems, J.M. Mahdi et al. evaluated a photovoltaic–thermal (PVT) collector integrated with nano-modified PCM containing 5 % nanoparticle volumetric concentration, achieving PV cooling durations of 54–305 min through-

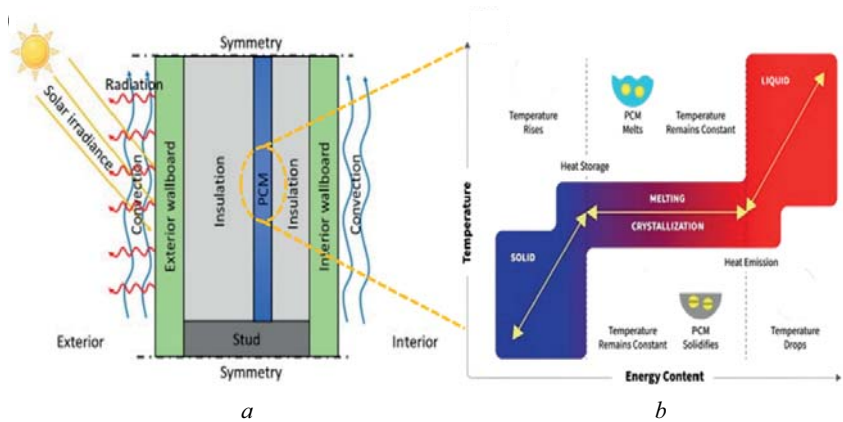


Fig. 2. Integration of PCM in Wall. Reprinted with permission from (a) [27]. Copyright 2020, Elsevier; working Principle of PCM (b). Reprinted with permission from [28]. Copyright 2022, Elsevier

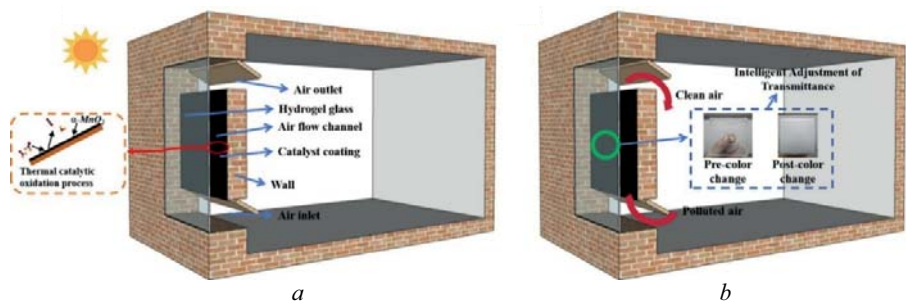


Fig. 3. Schematic of the system (a); schematic of the system operation (b). Reproduced with permission from [39]. Copyright 2025, Elsevier

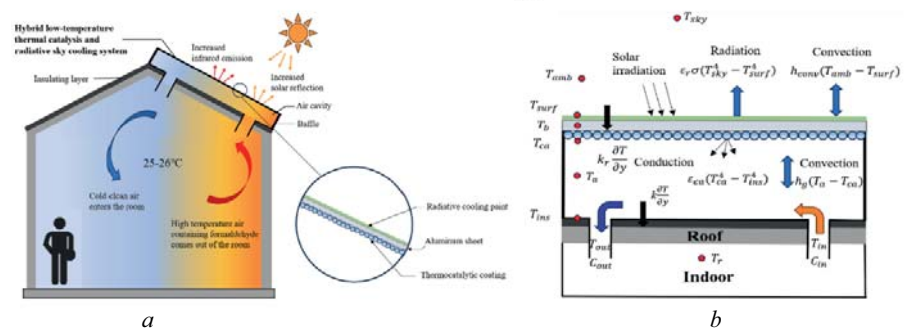


Fig. 4. Schematic of hybrid low-temperature thermal catalysis and radiative sky cooling system (a); schematic of system's heat transfer mechanism (b). Reproduced with permission from [40]. Copyright 2024, Elsevier

out the year, peak electrical output of approximately 52.5 W, and thermal power up to 225 W, demonstrating the potential of nano-enhanced PCMs to stabilize photovoltaic performance while simultaneously harvesting usable thermal energy for buildings [36]. In another study by Upadhyay et al., TiO_2 -enhanced paraffin PCMs for latent heat thermal energy storage (LHTES) systems using 0.5–2.0 wt. % nanoparticles were examined [35, 36]. The thermal conductivity increased by 35–88 %, accelerating the charging (heat storage) and discharging (heat release) processes of the PCM. At a heat transfer fluid flow rate of 0.01 kg s^{-1} , the 0.5 wt. % TiO_2 PCM improved charging, discharging, and overall LHTES efficiencies by 2.89, 5.21, and 2.25 %, respectively, as compared with pristine paraffin [37, 38].

Beyond latent heat storage alone, thermal adaptivity has also been realized through hybrid envelope systems that integrate passive thermal regulation with indoor air purification as illustrated in Fig. 3.

The catalytic Trombe wall configuration integrates thermochromic hydrogel glazing with an internal air channel coated with a catalytic layer, enabling simultaneous modulation of solar radiation and pollutant degradation. The hydrogel exhibits a temperature-driven reduction in solar transmittance from 0.9 to 0.3 within the 20–25 °C range, which suppresses excessive solar heat gains and mitigates overheating [39]. As a result, the system lowers the external wall surface temperature by up to 3.2 °C and reduces indoor air temperature by 2.5 °C compared with conventional Trombe walls. Con-

currently, the catalytic layer facilitates thermal catalytic oxidation of pollutants, achieving a 44.6 % formaldehyde removal efficiency within 70 min, thereby demonstrating the feasibility of multifunctional building envelopes that couple thermal adaptivity with indoor air quality control.

Complementarily, J. Gu et al. proposed a roof-integrated hybrid system that couples radiative sky cooling with low-temperature catalytic oxidation, as illustrated in Fig. 4, enabling continuous thermal regulation and indoor air purification under both daytime and nighttime conditions [40].

The system directs warm, polluted indoor air through an airflow channel coated with a thermocatalyst beneath a radiative cooling surface that reflects solar irradiation while emitting strongly in the infrared atmospheric window. This configuration facilitates simultaneous heat dissipation to the sky and catalytic decomposition of pollutants. Under summer ambient conditions of 35 °C, the system achieved an indoor–outdoor temperature difference of up to 5 °C and generated approximately $665.29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$ of purified air over a full day, demonstrating the effectiveness of integrating radiative cooling with catalytic air treatment for multifunctional thermal–environmental control at the building scale.

Architected Mechanical Metamaterials

Architected mechanical metamaterials represent a class of advanced material systems in which macroscopic mechanical behavior is governed primarily by engineered geometry, enabling unprecedented control over stiffness, deformation mode, energy absorption, and

wave propagation [41]. Unlike conventional construction materials whose properties are largely governed by composition and processing, mechanical metamaterials derive their multifunctionality from designed unit-cell architectures and hierarchical assemblies, enabling unprecedented control over stiffness, strength-to-weight ratio, deformation mode, wave propagation, and energy dissipation [42, 43]. This geometry-driven paradigm allows materials to exhibit properties that are difficult to achieve in bulk solids, including negative Poisson’s ratio, quasi-zero or negative stiffness, programmable compressibility, and tailored band-gap behavior for vibration and wave attenuation [44]. As illustrated in Fig. 5, architected mechanical metamaterials are conceived through a hierarchical design framework spanning intrinsic material constituents, unit-cell geometry, assembled structures, and device-level implementations, enabling ultralightweight behavior, ultra-high stiffness, negative mechanical response, and actively reconfigurable functionality that are relevant for smart building systems.

In the context of smart and sustainable buildings, architected mechanical metamaterials provides a transformative opportunity to decouple structural performance from material intensity, thereby enabling lightweight, multifunctional, and adaptive building components. By encoding function into geometry, metamaterials allow a single structural element to simultaneously serve load bearing, vibration-mitigation, sensing, and energy-harvesting roles. This capability is relevant for next-generation buildings, where structural components are expected to interact with cyber-physical building systems, respond to environmental stimuli, and contribute actively to resilience and energy efficiency rather than acting as passive supports [46]. At the building scale, distinct classes of architected metamaterials offer application-specific advantages depending on their deformation mechanisms and geometric programmability. Origami-inspired metamaterials, characterized by foldable and deployable architectures, are particularly well suited for adaptive façades, reconfigurable shading devices, and responsive building

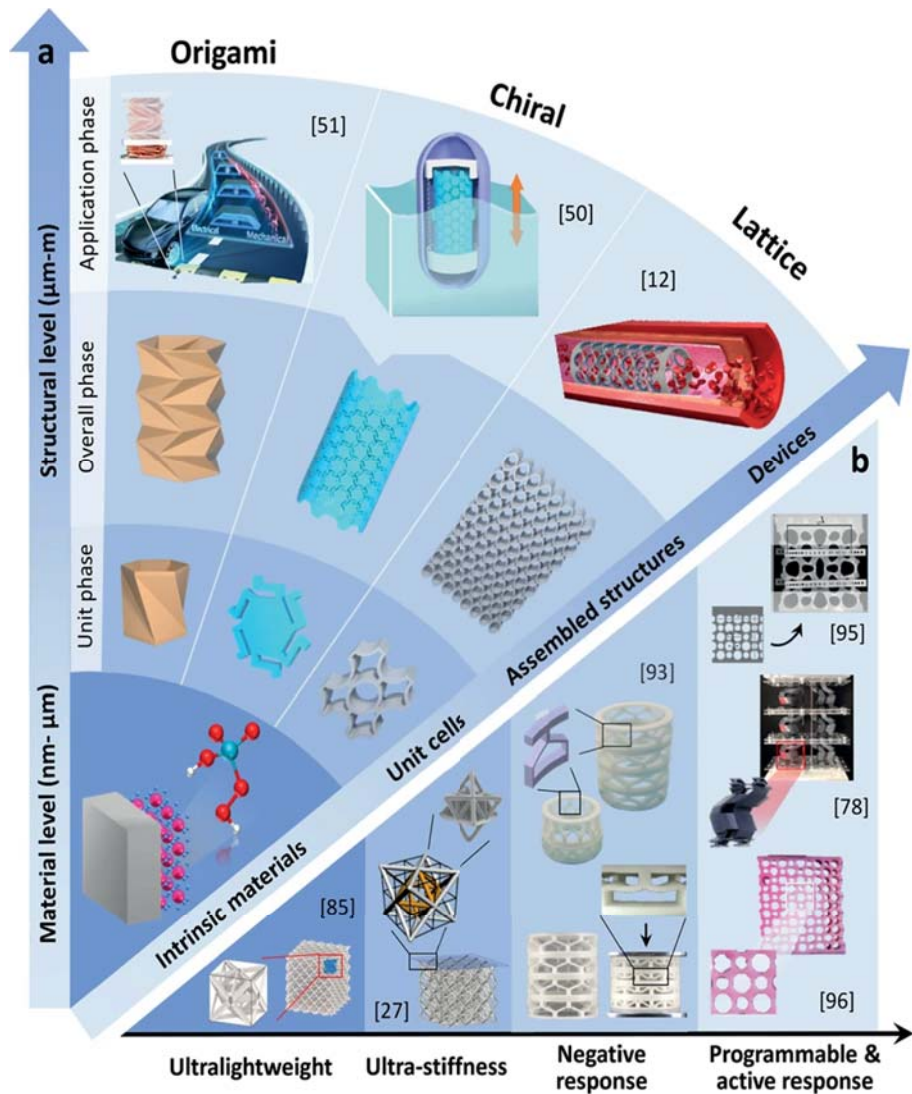


Fig. 5. Categories of Metamaterials from Material to Structural level (a); properties of Metamaterials (b). Reprinted with permission from [45]. Copyright 2023, Wiley

envelopes, where large, reversible shape transformations enable dynamic regulation of daylight, ventilation, and thermal exchange. Chiral and auxetic metamaterials, exhibiting rotational deformation mechanisms and negative Poisson's ratio behaviour, provide enhanced shear resistance, energy dissipation, and fracture tolerance, rendering them attractive candidates for seismic cores, impact-resistant walls, and vibration-mitigating structural elements. In contrast, periodic lattice and cellular metamaterials, including octet truss and triply periodic minimal surface (TPMS) architectures, offer exceptionally high stiffness-to-weight ratios and tunable damping characteristics, enabling lightweight load-bearing floors, adaptive slabs, vibration-isolating platforms, and multifunctional structural components [47].

From a systems perspective, architected mechanical metamaterials can be strategically integrated into structural, foundation, envelope, and interior subsystems of smart buildings. In structural and foundation systems, periodic and locally resonant metamaterial architectures enable attenuation of low-frequency vibrations and seismic waves through the formation of frequency band gaps, offering an alternative or complement to conventional base-isolation techniques. Unlike traditional isolation systems which often suffer from large displacements or limited effectiveness against vertical motion, metamaterial foundations can be designed to target dominant seismic frequencies while preserving load-bearing capacity and structural integrity [48]. A prominent example is the development of seismic metamaterial foundations, where periodic or locally resonant structures are embedded beneath building superstructures to attenuate both horizontal and vertical seismic waves. Y. Jiang et al. experimentally validated a scaled metamaterial foundation (MMF)

for a multi-storey building as exhibited in Fig. 6, demonstrating effective vibration attenuation in ultra-low-frequency regimes (<10 Hz) without compromising structural stability [49].

The attenuation arises from geometry-induced band gaps and local resonance effects, as evidenced by the dispersion characteristics shown in figure, rather than from added material damping or mass. Despite this strong vibration-filtering capability, the metamaterial foundation preserved adequate load-bearing capacity and structural stability, thereby confirming the practical feasibility of metamaterial-based seismic protection strategies for real civil infrastructure. In building envelopes and interior systems, architected lattices and cellular metamaterials provide enhanced vibration isolation, acoustic attenuation, and impact resistance while significantly reducing structural mass. Such characteristics are particularly beneficial for high-rise buildings, prefabricated floor panels, façade elements, and floating floors, where vibration comfort and noise control are critical performance metrics. Moreover, the ability to tune stiffness and damping through unit-cell design enables adaptive responses to changing occupancy, loading conditions, and environmental stimuli [42, 50]. J. Shi et al. introduced a metaconcrete backfill system incorporating locally resonant inclusions within a cementitious matrix to suppress ground-borne vibrations. The experimental results demonstrated significant attenuation of traffic- and rail-induced vibrations in the 5–30 Hz range, achieving subwavelength vibration isolation that is not attainable using traditional trenches or piles. This approach offers a scalable solution for vibration-sensitive smart buildings located in dense urban corridors [51]. In another study, Alavi established a foundational framework po-

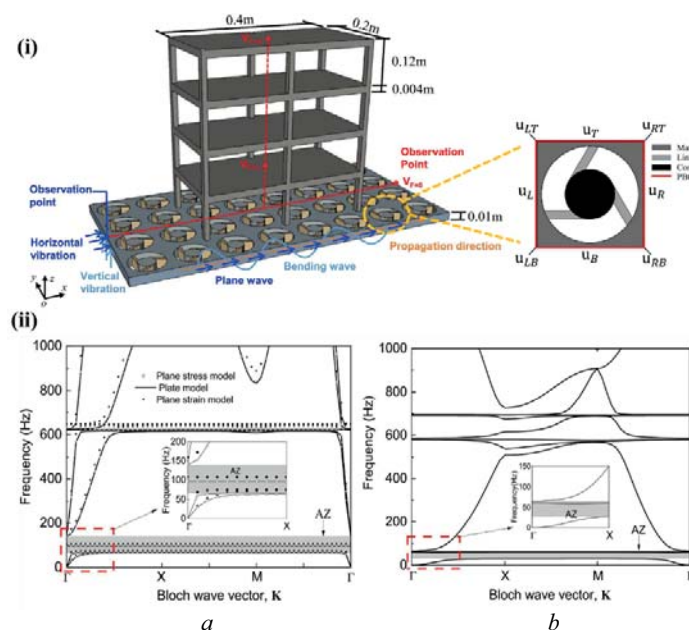


Fig. 6. MMF-frame model under plane- and bending-waves incident with unit cell subjected to periodic boundary condition (i); dispersion curves of (ii) (a); plane waves and (b) bending waves. Reprinted with permission from [49]. Copyright 2025, Elsevier

sitioning mechanical metamaterials as intelligent civil infrastructure, showing that architected cementitious and lattice-based systems achieved 20–40 % reductions in material density while retaining compressive strength within ~10 % of conventional concrete, corresponding to specific strength values exceeding $0.08 \text{ MPa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, significantly higher than those of traditional construction materials. This geometry-induced efficiency enabled seismic damping, vibration isolation functionalities to be integrated within load-bearing systems.

Beyond mechanical functions, architected metamaterials also serve as enabling platforms for multifunctional integration. By embedding smart material phases such as piezoelectric, triboelectric, or magneto-responsive elements within architected frameworks, structural components can function as distributed sensors, actuators, and energy harvesters. This integration supports self-powered structural health monitoring, real-time feedback, and interaction with building management systems, thereby reinforcing the role of metamaterials within cyber–physical–material building architectures [52]. R. Hamzehei et al. reported multifunctional 3D-printed sinusoidal mechanical metamaterials that combine quasi-zero stiffness (QZS) vibration isolation with integrated energy harvesting, enabling self-powered components for smart buildings [52]. The lattices were fabricated from thermoplastic polyurethane (TPU) for reversible buckling of sinusoidal struts to achieve QZS behavior and effective vibration isolation for excitation frequencies above ~15 Hz, where transmissibility dropped below unity. A piezoelectric bimorph actuator positioned in high-strain lattice regions produced peak voltages of ~3 V and power densities of $600\text{--}700 \text{ } \mu\text{Wg}^{-1}$ at 15 Hz. Additionally lead zirconate titanate (PZT) patches mounted on a semi-honeycomb support generated ~500 mV with power densities approaching $800 \text{ } \mu\text{Wg}^{-1}$ at ~90 Hz, sufficient to power low-energy wireless sensors, demonstrating the feasibility of self-sustained vibration isolation and structural health monitoring in next-generation smart buildings. At the material-system level, Barri et al. developed nano-generator-integrated metamaterial concrete, embedding auxetic polymer lattices within a conductive cementi-

tious matrix [53]. The resulting composites achieved up to 15 % reversible compressibility under cyclic loading while delivering a peak electrical power output of approximately $330 \text{ } \mu\text{W}$, enabling simultaneous load-bearing, energy harvesting, and self-powered sensing. These geometry-driven material classes enable the rational tailoring of mechanical performance at architectural scales, supporting the integration of adaptability, resilience, and multifunctionality within next-generation smart and sustainable building systems.

Energy-Harvesting and Smart Functional Composites

Energy-harvesting functional composites are emerging as a critical materials platform for net-zero and climate-resilient buildings, as they convert ubiquitous building excitations like ambient vibrations, cyclic service loads, footfall, façade/wind-induced oscillations, and thermal gradients into usable electrical energy while simultaneously enabling self-powered sensing and structural intelligence [54–56]. Unlike conventional renewable energy systems such as rooftop photovoltaics or external energy storage units, these material systems embed energy transduction mechanisms directly within the building fabric, enabling distributed, decentralised, and maintenance-free power generation while preserving structural integrity [57]. This paradigm shift transforms buildings from passive energy consumers into energy-active infrastructures, capable of harvesting ambient mechanical, thermal, and environmental stimuli inherent to the built environment [58].

As illustrated in Fig. 7, energy-harvesting and smart functional composites can be strategically integrated into floors, foundations, walls, facades, and roof systems, where they harvest mechanical and thermal energy generated during routine building operation [59]. The locally generated electrical output is utilised to power distributed sensor nodes for structural health monitoring, vibration tracking, occupancy detection, and environmental sensing, enabling continuous data acquisition without reliance on external power infrastructure. When coupled with conductive or self-sensing composite matrices, these systems further support real-time detection of strain evolution, crack initiation, and damage accumulation [60].

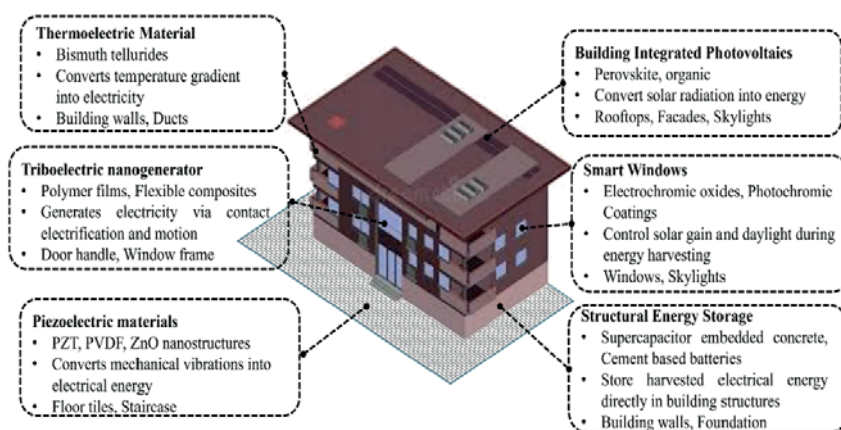


Fig. 7. Integration of Smart Materials into different Components of a Building

This decentralised, material-embedded energy and sensing architecture transforms the building from a passive energy consumer into an energy-active, information-rich system, capable of predictive maintenance, adaptive response, and enhanced operational resilience. Such material-centric intelligence underscores the pivotal role of energy-harvesting functional composites in next-generation green buildings, where sustainability, durability, and smart functionality are co-designed at the material level. In a study by H.B. Birgin et al., the eco-earth cement composite reinforced with carbon microfibers integrating strain-sensing functionality into sustainable construction materials was studied [60]. By partially replacing cement and introducing carbon microfibers near the electrical percolation threshold (0.025–0.25 wt. %), the composite achieved gauge factors exceeding 100 while maintaining adequate mechanical integrity for non-load-bearing and low-rise building applications, highlighting multifunctionality embedded at the material level, reducing environmental footprint while enabling real-time structural monitoring.

Further, in a study by M. Ergün et al., a smart reinforced concrete (RC) building was numerically modelled using finite element (FE) analysis and instrumented with piezoelectric sensor locations, with the numerical framework validated through a corresponding experimental setup as shown in Fig. 8 [61].

The structure was subjected to realistic service-level live loads representing occupants and furniture, as well as seismic excitations applied in the vertical direction to simulate earthquake-induced vibrations. The experimentally measured vibration responses showed strong agreement with FE predictions for an initial displacement of 18 mm, demonstrating accurate capture of the system’s dynamic characteristics. A similar correspondence was observed at a higher initial displacement of 28 mm, confirming the robustness of the numerical model in

predicting vibration behavior and energy-harvesting-relevant responses under varying excitation intensities.

In a study by W. Thongthaphai et al., a portland cement (PC) and natural rubber (NR) based triboelectric nanogenerator (PC/NR-SL-T TENG) positioned as a smart energy floor for harvesting biomechanical excitations (walking, running, crowd-induced vibrations) was developed [61]. Within 1–10 Hz, the peak-to-peak voltage (V_{pp}) increased from 46 V (1 Hz) to 242 V (10 Hz), evidencing a strong frequency-mediated amplification relating to real ambient excitation spectra in built environments. The power density reached 3.27 W/m² at 5 N and 5 Hz, which is ~11 times higher than pristine PC TENG (0.29 W/m²). The floor is further reinforced by capacitor having charging capability (10–47 μF) under 5 N and 5 Hz via a rectifier circuit, indicating feasibility for intermittent powering or buffering strategies in self-powered sensing nodes. In a similar study, He et al. targeted the long-standing moisture sensitivity of wood-based triboelectric systems by engineering an all-wood-based TENG (AW-TENG) using treated wood as the friction layer and compressed-carbonized wood as the electrode, thereby enhancing hydrophobicity and conductivity through processing [63, 64]. Under a high-humidity environment (80 % RH), the optimized AW-TENG achieved open circuit voltage V_{oc} = 50.85 V and short circuit current I_{sc} = 0.72 μA. In contrast to cementitious TENG floors, the AW-TENG route leverages biomass engineering and wood-electrode carbonization addressing environmental robustness. Further, E. Keel et al. reported a high-output TENG based on 3D graphene foam (3DG)/PET, where the graphene surface exhibited a hydrophobic contact angle of 138.52° and a surface roughness of 2.4 ± 0.5 μm, both contributing to enhanced charge generation and reduced interfacial adhesion. The 3DG-based device delivered an open-circuit voltage of 400 V, a short-circuit current of 105.7 μA, and an output

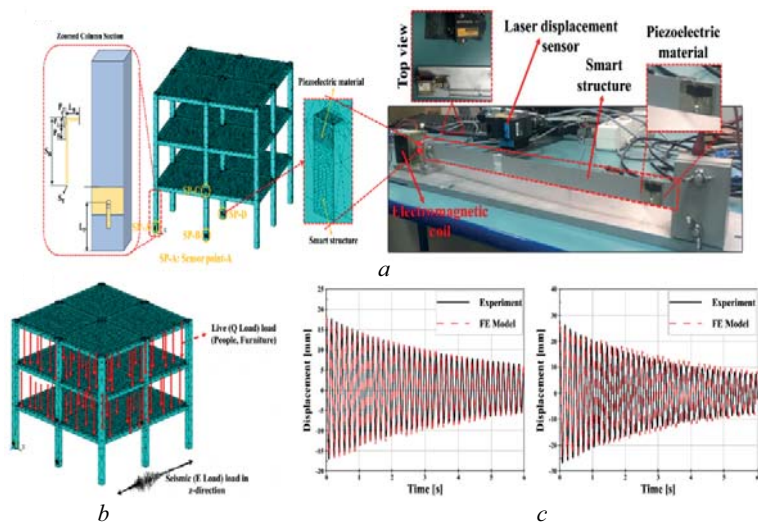


Fig. 8. FE model and sensor locations of smart RC building along with its experimental setup (a); live and Seismic loads (b); experimental and simulation vibration responses at a 18 mm and b 28 mm respectively (c). Reprinted with permission from [62]. Copyright 2025, Springer

power density of 10,372 mWm⁻² at 3 Hz with a 40 MΩ load resistance.

In complementary to floor-based harvesting, roof-integrated triboelectric systems have been explored for capturing rainfall-induced mechanical energy. In a study by Dai et al., a droplet energy harvester (DEH) was evaluated on roofs with varying inclination angles and architectural geometries [54]. For inclined roofs, the instantaneous peak power per droplet decreased sharply with increasing tilt angle, from 81.6 μW at 100° to 0.42 μW at 180°, highlighting the role of impact dynamics and sliding behavior. For different roof morphologies, the DEH generated 12.14 μW on a classical roof, 146.6 μW on a dome-shaped roof, and 86.3 μW on a tower-type roof, demonstrating that architectural curvature significantly influences energy harvesting efficiency. Under simulated rainfall, a 4.7 μF capacitor was charged to 1.0, 0.4 and 0.2 V at flow rates of 9, 45, and 64 mLs⁻¹, respectively. The Table 2 compares TENG based on different materials as a triboelectric layer.

Further, yarn-based smart cement composites incorporating braided core sheath triboelectric yarns embedded directly within Portland cement have demonstrated that structural reinforcement, mechanical energy harvesting, and self-powered sensing can be achieved simultaneously [74]. Through controlled modification of yarn surface morphology, triboelectric output voltages were enhanced by more than 120 %, while full-scale pavement implementations achieved 100 % accuracy in vehicle classification, speed detection, and pedestrian recognition when coupled with wireless data transmission and deep-learning algorithms. Complementary to yarn-reinforced cement, conductive cement-based composites incorporating carbon fillers near the electrical percolation threshold further enable cement to function as a structural energy material. These systems support contact-electrification-driven triboelectric energy harvesting from wind, biomechanical motion, while also functioning as structural capacitors

capable of local energy storage. Yuan et al. investigated geopolymer-based thermoelectric composites as infrastructure-native energy materials for buildings [74]. By incorporating conductive fillers, the geopolymer exhibited a Seebeck coefficient of up to 1,092 μV K⁻¹ at 293 K and a maximum power factor of 0.84 μWm⁻¹K⁻², while maintaining compressive strength of 33.4 MPa.

In another study, Ra et al. studied a cement-based conductive composite triboelectric nanogenerator (CBC-TENG) integrated into a net-zero energy structure, as illustrated in the Fig. 9 showing wall (wind), floor (human motion), and roof (raindrop) harvesting modes [12]. The wall-mounted CBC-TENGs under wind, generated a continuous rectified output voltage of ~5 V, whereas floor-integrated CBC-TENGs harvested biomechanical energy via solid–solid contact electrification during repeated stepping, producing stable alternating outputs after rectification. Roof-mounted CBC-TENGs, operating through liquid–solid contact electrification, generated voltages from deionized water droplets at 1 Hz and 65° roof inclination, with output voltage increasing systematically with droplet frequency. Beyond cementitious materials, C. Prouskas et al. proposed a U-shaped light-trapping dye sensitized solar cell (DSSC) architecture designed for outdoor operation [75]. The geometry redistributes incident sunlight onto vertically mounted DSSCs via internal reflection, effectively reducing local irradiance and limiting photo-degradation. The configuration enabled a fill factor increase to ~96 % under outdoor illumination, while maintaining electrical energy generation comparable to conventional vertically irradiated DSSCs. Apart from photovoltaic envelopes, Fu et al. developed thermotropic ionic hydrogel smart windows that couple adaptive solar regulation with thermoelectric energy harvesting [76]. The hydrogel exhibited a reversible phase transition near 26 °C, enabling high luminous transmittance (>90 %) below the transition temperature and strong solar modulation (≈80 %) above it. Simulta-

Table 2. Comparison of TENG based on different materials as a triboelectric layer

Materials		Properties			References
Electronegative	Electropositive	Open Circuit Voltage V_{oc} , V	Short circuit current I_{sc} , μA	Output power density P_{out} , mW/m ²	
Polyimide	Laser Induced Graphene	3,500	60	2,361	[65]
Graphite	Crumpled Graphene	15	–	15	[66]
PDMS	CNT	383	25	8,000	[67]
Polyethylene terephthalate	Silk Fibroin Films	213.9	0.34	68	[68]
PDMS	Shear Exfoliated Graphene	233	0.731	131.4	[69]
Polyethylene terephthalate	3D Graphene	400	105.7	10,372	[70]
PLA	Gelatin	500	16	5,000	[71]
Nitrocellulose paper	Weighing paper	360	250	–	[72]
Carbon-filled PVDF	Nylon-6	1.4	6	19.7	[73]

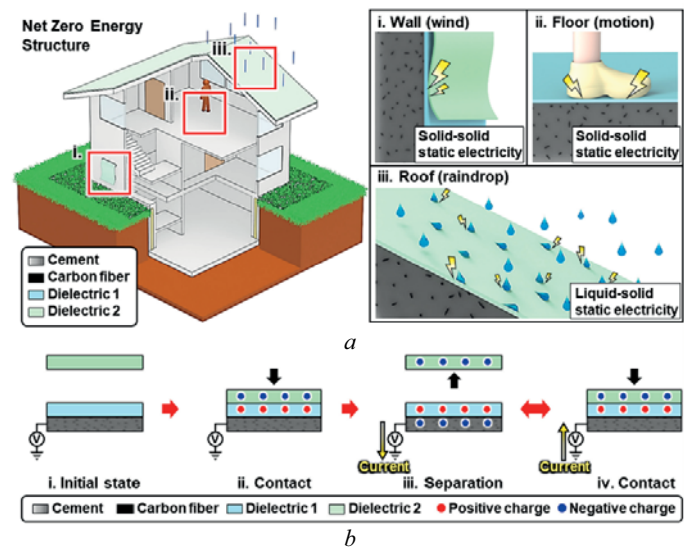


Fig. 9. Conceptual schematic of a net-zero-energy residential system illustrating the integration of CBC-based structural components capable of harvesting multiple ambient renewable energy sources (a); including wind-induced energy (i); biomechanical energy generated by human activity (ii); and raindrop-induced energy (iii); schematic representation of the contact-electrification-driven energy harvesting mechanism enabled through the incorporation of CBC (b). Reprinted with permission from [12]. Copyright 2021, Elsevier

neously, the temperature-gradient-driven ionic transport generated a pronounced thermoelectric response, with a seebeck coefficient of 39.03 mVK^{-1} , a power factor of $0.838 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-2}$, and an areal energy density up to 250 mJm^{-2} , demonstrating multifunctional window elements for smart buildings.

Future Scope

The advancement of green and smart building technologies requires a transition from single-function construction materials toward intrinsically multifunctional, adaptive, engineered material systems capable of sustaining performance under severe conditions. The development of hybrid smart materials integrating thermal regulation, mechanical resilience, self-sensing, and energy transduction within a unified material framework would reduce interfacial complexity and enhance functional synergy. Such materials require advanced composite architectures in which latent heat storage phases, conductive networks, and stimuli-responsive polymers coexist without adverse cross-coupling effects. Further, the design of fatigue-resistant and self-stabilizing material chemistries leveraging dynamic covalent bonding, supramolecular interactions, or reversible crosslinking mechanisms is critical for sustaining functional integrity under prolonged cyclic thermal and mechanical loading. Architected mechanical metamaterials should advance toward geometry-programmable systems capable of adaptive stiffness modulation, vibration attenuation, and reconfigurable energy dissipation through material phase transitions or stress-induced instabilities. In addition, the emergence of energy-active structural materials, where cementitious, polymeric, or bio-derived matrices embedded with triboelectric, piezoelectric, or thermoelectric phases function simultaneously as load-bearing

components and distributed energy harvesters is critical. The smart materials must also exhibit environmental robustness, maintaining stable functional responses under humidity, ultraviolet radiation, and temperature extremes through encapsulation and surface-engineering strategies. The materials should be bio-inspired and lifecycle-engineered material systems that combine hierarchical design, intrinsic self-sensing capability, and recyclability, enabling buildings to evolve into energy-active, information-rich, and sustainable infrastructures rather than passive structural assemblies.

CONCLUSION

Smart and green buildings have emerged as a central component of global strategies aimed at mitigating climate change, reducing resource consumption, and improving the resilience and livability of the built environment. As buildings transition from static energy consumers to adaptive and performance-driven systems, advanced materials play a decisive role in enabling this transformation. This review has examined next-generation smart and multifunctional materials that support the development of intelligent, low-carbon, and climate-resilient buildings. Material systems such as architected mechanical metamaterials and energy-harvesting functional composites demonstrate the essential functions of a building including thermal regulation, vibration mitigation, energy conversion, sensing, and adaptive response, which can be intrinsically embedded within structural and envelope components. By leveraging material composition, microstructural design, and geometry-governed behavior, these systems enable functionality to emerge directly from the material rather than through external subsystems. The growing integration of respon-

sive and self-sensing materials further strengthens this paradigm by enabling condition awareness, functional adaptability, and performance stability under dynamically varying environmental and occupancy conditions. The continued advancement in material design and performance is improving reliability and supporting

alignment with building-scale requirements. These developments position smart materials as key enablers for constructing buildings as adaptive, energy-active, and intelligent systems capable of contributing meaningfully to long-term sustainability, climate resilience, and human-centric performance.

REFERENCES / СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Firoozi A.A., Firoozi A.A., Oyejobi D.O., Avudaiappan S., Flores E.S. Emerging trends in sustainable building materials: Technological innovations, enhanced performance, and future directions. *Results in Engineering*. 2024; 24:103521. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103521
2. Kurdi A., Almoatham N., Mirza M., Ballweg T., Alkahlan B. Potential Phase Change Materials in Building Wall Construction : a Review. *Materials*. 2021; 14(18):5328. DOI: 10.3390/ma14185328
3. Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025. *UNEP — UN Environment Programme*. 2025. URL: <https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction-20242025>
4. Jain H., Dhupper R. Holistic strategies for sustainable buildings and their impacts on soil and environmental health. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. 2026; 11(1). DOI: 10.1007/s41024-025-00688-4
5. Kallayil A., Patadiya J., Kandasubramanian B., Adamtsevich A., Kchaou M., Aldawood F.K. Adaptive Smart Materials in Architecture: Enhancing Durability and Sustainability in Modern Construction. *ACS Omega*. 2025; 10(22):22305–22322. DOI: 10.1021/acsomega.4c04943
6. The 17 Goals. *Sustainable Development*. 2025. URL: <https://sdgs.un.org/goals>
7. De Araujo V., Mascarenhas F., Laleicke F., Kutnar A., Dias A., van de Kuilen J. et al. Biocities with wood and bamboo: A path to low-carbon urbanization for greener societies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2026; 226:116257. DOI: 10.1016/j.rser.2025.116257
8. Kim M.S., Kim E.S. Moss-based building greening: A review on enhancing sustainability of concrete cityscapes. *Ecological Engineering*. 2026; 223:107826. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2025.107826
9. Dhayal K.S., Agrawal S., Agrawal R., Kumar A., Giri A.K. Green energy innovation initiatives for environmental sustainability: current state and future research directions. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024; 31(22):31752–31770. DOI: 10.1007/s11356-024-33286-x
10. Patadiya J., Kandasubramanian B., Sreeram S., Patil P.D., Mujawar R., Indalkar A. et al. Strategic Implementation of Multimaterial Additive Manufacturing: Bridging Research and Real-World Applications. *ACS Omega*. 2025; 10(14):13749–13762. DOI: 10.1021/acsomega.4c11279
11. Abera Y.A. Sustainable building materials: A comprehensive study on eco-friendly alternatives for construction. *Composites and Advanced Materials*. 2024; 33. DOI: 10.1177/26349833241255957
12. Ra Y., You I., Kim M., Jang S., Cho S., Kam D. et al. Toward smart net zero energy structures: Development of cement-based structural energy material for contact electrification driven energy harvesting and storage. *Nano Energy*. 2021; 89:106389. DOI: 10.1016/j.nanoen.2021.106389
13. Krueger K., Stoker A., Gaustad G. “Alternative” materials in the green building and construction sector. *Smart and Sustainable Built Environment*. 2019; 8(4):270–291. DOI: 10.1108/sasbe-09-2018-0045
14. Peri G., Cirrincione L., Mazzeo D., Matera N., Scaccianoe G. Building resilience to a warming world: A contribution toward a definition of “Integrated Climate Resilience” specific for buildings : Literature review and proposals. *Energy and Buildings*. 2024; 315:114319. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114319
15. Duan W., Yuan W., Shen D., Liu X., Wang Yu. Thermal Adaptive Behavior-Recognition Model with Cross-Modal Knowledge Distillation. *New Technologies on Building Energy Saving and Housing Thermal Comfort*. 2025. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/22/4071>
16. Bai Y., Lv C., Liu L. Spatiotemporal modeling of infrared thermal adaptive behavior recognition for personal thermal comfort prediction. *Energy and Buildings*. 2025; 348:116406. DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.116406
17. Lu X., Liu J., Wang S., Teng Y., He Y., Su Y. et al. Infrared thermography-based behavior recognition: pedestrian skin temperature and thermal adaptive behaviors in outdoor activities for thermal comfort analysis. *Building and Environment*. 2026; 289:114075. DOI: 10.1016/j.buildenv.2025.114075
18. Li H., Dong Q., Li Y., Hu E., Cai Yu., Zhang L. et al. Thermal-Adaptive Photonic MOFs for High-Performance X-ray Scintillator. *Advanced Functional Materials*. 2025. URL: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/adfm.202500445>
19. Li K., Liu F., Luo Y., Khoso M.A. Non-Invasive Multivariate Prediction of Human Thermal Comfort Based on Facial Temperatures and Thermal Adaptive

Action Recognition. *Energies*. 2025; 18(9):2332. DOI: 10.3390/en18092332

20. Rentala G., Zhu Y., Mukhopadhyay S. Application of time series analysis to improve the validity of Immersive virtual environments for collecting occupant thermal state and adaptive behavioral intention data. *Advanced Engineering Informatics*. 2024; 61:102449. DOI: 10.1016/j.aei.2024.102449

21. Apriliyanthi S.R., Sakoi T., Nakaya T., Kubota T., Koerniawan M.D., Alfata M.N. F. et al. Occupants' Thermal Adaptive Behavior Pattern in Indonesian Residential Buildings. *Buildings*. 2025; 15(1):86. DOI: 10.3390/buildings15010086

22. Li H., Liu Y., Wu H., Lin B., Lei L., He J. Thermal preference prediction through infrared thermography technology: Recognizing adaptive behaviors. *Building and Environment*. 2024; 262:111829. DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111829

23. Xu M., Han Y., Zhu N., Yang B. A method for recognizing individual dynamic thermal adaptations using wireless signals. *Energy and Buildings*. 2025; 333:115448. DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.115448

24. Cordero A.S., Melgar S.G., Márquez J.M.A. Validation of Dynamic Natural Ventilation Protocols for Optimal Indoor Air Quality and Thermal Adaptive Comfort during the Winter Season in Subtropical-Climate School Buildings. *Applied Sciences*. 2024; 14(11):4651. DOI: 10.3390/app14114651

25. Zhang Y., Ma G., Wu G., Liu S., Gao L. Thermally adaptive walls for buildings applications: A state of the art review. *Energy and Buildings*. 2022; 271:112314. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112314

26. Abdel-Rahman O., Roubay E., Afify M.M. Thermal performance evaluation of phase changing materials in double glazing units for office buildings in Egypt. *Scientific Reports*. 2025; 15(1). DOI: 10.1038/s41598-025-88206-x

27. Kishore R.A., Bianchi M.V.A., Booten C., Vidal J., Jackson R. Optimizing PCM-integrated walls for potential energy savings in U.S. Buildings. *Energy and Buildings*. 2020; 226:110355. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110355

28. Hekimoğlu G., Sari A. A review on phase change materials (PCMs) for thermal energy storage implementations. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 58:1360-1367. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.231

29. Kulkarni P., Muthadhi A. Improving thermal and mechanical properties of light weight aggregate concrete using inorganic phase changing material, expanded clay aggregate, alccofine1203 and manufacturing sand. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2021; 6(2). DOI: 10.1007/s41062-021-00460-w

30. Hamid H., Chorzepa M.G. Quantifying maximum temperature in 17 mass concrete cube specimens made with mixtures including metakaolin and/or slag. *Construction and Building Materials*. 2020; 252:118950. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118950

31. Mahdaoui M., Hamdaoui S., Ait Msaad A., Kousksou T., El Rhafiki T., Jamil A. et al. Building bricks with phase change material (PCM): Thermal performances. *Construction and Building Materials*. 2021; 269:121315. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121315

32. Zou W., Wang Z., Sun Z., Jiang X., Yu M., Song L., et al. A thermochromic wood that can change colour at 24–40 °C and collect heat for heating flooring. *Industrial Crops and Products*. 2022 186:115293. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.115293

33. Zor M., Li J., Şen F., Can A., Wang X. Rodriguez D. et al. Characterization of phase-changing materials as stabilized thermal energy storage in impregnated biomaterial. *Journal of Industrial Textiles*. 2025; 55. DOI: 10.1177/15280837241306131

34. Guo Y., Guo X., Yin X., Zhang X., Hu S., Zhang Y. et al. Thermally driven memory flexible phase change hydrogel for solar energy efficient building thermal management. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2025; 279:113248. DOI: 10.1016/j.solmat.2024.113248

35. Gopalan A., Antony A.S.M., Suresh R., Sahoo S., Livingston L.M.M., Titus A. et al. Performance enhancement of building energy through the combination of dynamic insulation panels and phase changing materials. *Energy Reports*. 2022; 8:945-958. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.10.281

36. Mahdi J.M., Al-Najjar H.M.T., Togun H., Biswas N., Boujelbene M., Alshammari S. et al. Year-round performance evaluation of photovoltaic-thermal collector with nano-modified phase-change material for building application in an arid desert climate zone. *Energy and Buildings*. 2024; 320:114597. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114597

37. Upadhyay V.V., Singhal S., Pandey A. Enhancing latent heat thermal energy storage efficiency: thermal performance analysis of phase change material enriched with TiO₂ nanoparticles. *Engineering Research Express*. 2025; 7(2):025546. DOI: 10.1088/2631-8695/add8e3

38. Wu H., Zhang G., Li J., Wang W., Li N., Ji J. et al. A catalytic Trombe wall with thermochromic hydrogel: experimental and numerical study. *Applied Thermal Engineering*. 2025; 278:127454. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.127454

39. Xu F., Che L., Zhang G., Cao X., Li N., Song G. et al. A novel hybrid low-temperature thermal catalysis and radiative sky cooling system for day and night air purification and cooling. *Energy*. 2024; 313:133795. DOI: 10.1016/j.energy.2024.133795

40. Gu J., Zhao W., Zeng C., Liu L., Leng J., Liu Y. Construction of mechanical metamaterials and their extraordinary functions. *Composite Structures*. 2025; 356:118872. DOI: 10.1016/j.compstruct.2025.118872

41. Jiao P., Alavi A.H. Artificial intelligence-enabled smart mechanical metamaterials: advent and future trends. *International Materials Reviews*. 2021; 66(6):365-393. DOI: 10.1080/09506608.2020.1815394

42. Gupta S., Gnanamoorthy R., Kandasubramanian B. Additive manufacturing of topology optimized multi-functional cellular framework for enhanced energy absorption. *Progress in Additive Manufacturing*. 2025; 10(11):8865–8893. DOI: 10.1007/s40964-025-01190-6
43. Bechthold M., Weaver J.C. Materials science and architecture. *Nature Reviews Materials*. 2017; 2(12). DOI: 10.1038/natrevmats.2017.82
44. Jiao P., Mueller J., Raney J.R., Zheng X., Alavi A.H. Mechanical metamaterials and beyond. *Nature Communications*. 2023; 14(1). DOI: 10.1038/s41467-023-41679-8
45. Alavi A.H. Metamaterials Break the Constraints of Traditional Civil Infrastructure. *Advanced Materials*. 2025; 38(6). DOI: 10.1002/adma.202518198
46. Lu C., Hsieh M., Huang Z., Zhang C., Lin Y., Shen Q. et al. Architectural Design and Additive Manufacturing of Mechanical Metamaterials : a Review. *Engineering*. 2022; 17:44–63. DOI: 10.1016/j.eng.2021.12.023
47. Pishvar M., Harne R.L. Foundations for Soft, Smart Matter by Active Mechanical Metamaterials. *Advanced Science*. 2020; 7(18):2001384. DOI: 10.1002/advs.202001384
48. Huang J., Chen R., Zhang Z., Liu G., Borjigin S., Scarpa F. Seismic metamaterials as foundations for buildings subjected to incident plane and bending waves: Simulation and experiment. *Engineering Structures*. 2025; 343:121187. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.121187
49. Jiang Y., Wang Q. Highly-stretchable 3D-architected Mechanical Metamaterials. *Scientific Reports*. 2016; 6(1). DOI: 10.1038/srep34147
50. Shi J., Cao Z., Xiao L., Lu H. A novel metaconcrete barrier as backfill of foundation pit to mitigate ground-borne vibration. *Transportation Geotechnics*. 2025; 55:101666. DOI: 10.1016/j.trgeo.2025.101666
51. Wang H., Zhao S., Xu C., Sun K., Fan R. Engineering Metamaterials for Civil Infrastructure: From Acoustic Performance to Programmable Mechanical Responses. *Materials*. 2025; 18(17):4032. DOI: 10.3390/ma18174032
52. Hamzehei R., Varnosfaderani M.A., Bodaghi M., Wu N. 3D-printed multi-functional sinusoidal metamaterials for simultaneous vibration isolation and electricity generation. *Engineering Structures*. 2025; 345:121496. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.121496
53. Barri K., Zhang Q., Kline J., Lu W., Luo J., Sun Z. et al. Multifunctional Nanogenerator-Integrated Metamaterial Concrete Systems for Smart Civil Infrastructure. *Advanced Materials*. 2023; 35(14). DOI: 10.1002/adma.202211027
54. Dai Q., Qian J., Li S., Tao L. Green Energy Harvesting and Management Systems in Intelligent Buildings for Cost-Effective Operation. *Buildings*. 2024; 14(3):769. DOI: 10.3390/buildings14030769
55. Huang Y.S., Hsieh P.H. Interface Circuits for Piezoelectric Energy Harvesting: A review of designs and methods. *IEEE Solid-State Circuits Magazine*. 2021; 13(4):98–111. DOI: 10.1109/mssc.2021.3111388
56. Pandiyan P., Saravanan S., Usha K., Kannadasan R., Alsharif M.H., Kim M.K. Technological advancements toward smart energy management in smart cities. *Energy Reports*. 2023; 10:648–677. DOI: 10.1016/j.egy.2023.07.021
57. Cui K., Lau D., Chang J. Advancements in energy harvesting through building materials : a critical review. *Journal of Building Engineering*. 2024; 98:111412. DOI: 10.1016/j.job.2024.111412
58. Chen Y., Hong J., Xiao Y., Zhang H., Wu J., Shi Q. Multimodal Intelligent Flooring System for Advanced Smart-Building Monitoring and Interactions. *Advanced Science*. 2024; 11(40). DOI: 10.1002/advs.202406190
59. Bal S., Rani N.R.A. Next generation building materials for energy efficiency and climate responsive design. *Discover Applied Sciences*. 2025; 7(8). DOI: 10.1007/s42452-025-07360-z
60. Birgin H.B., D'Alessandro A., Meoni A., Ubertini F. Self-Sensing Eco-Earth Composite with Carbon Microfibers for Sustainable Smart Buildings. *Journal of Composites Science*. 2023; 7(2):63. DOI: 10.3390/jcs7020063
61. Ergün M., Uyar M., Malgaca L. Performance analysis of piezoelectric-based energy harvesting in reinforced concrete buildings under seismic and live loads. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2025; 47(10). DOI: 10.1007/s40430-025-05857-7
62. Thongthapthai W., Sintusiri J., Prada T., Thongbai P., Amornkitbamrung V., Chindaprasit P. et al. Lightweight cement-natural rubber nanocomposites for high-performance triboelectric nanogenerators in smart flooring applications. *Construction and Building Materials*. 2025; 501:144230. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.144230
63. He P., Li X., Wang M., Lv D., Wang J., Zou L. et al. High humidity-resisted all-wood-based triboelectric nanogenerator for energy harvesting and human motion monitoring. *Chemical Engineering Journal*. 2025; 521:167158. DOI: 10.1016/j.ccej.2025.167158
64. Stanford M.G., Li J.T., Chyan Y., Wang Z., Wang W., Tour J.M. Laser-Induced Graphene Triboelectric Nanogenerators. *ACS Nano*. 2019; 13(6):7166–7174. DOI: 10.1021/acsnano.9b02596
65. Chen H., Xu Y., Zhang J., Wu W., Song G. Enhanced stretchable graphene-based triboelectric nanogenerator via control of surface nanostructure. *Nano Energy*. 2019; 58:304–311. DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.01.029
66. Matsunaga M., Hirotani J., Kishimoto S., Ohno Y. High-output, transparent, stretchable triboelectric nanogenerator based on carbon nanotube thin film toward wearable energy harvesters. *Nano Energy*. 2020; 67:104297. DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.104297

67. Liu C., Li J., Che L., Chen S., Wang Z., Zhou X. Toward large-scale fabrication of triboelectric nanogenerator (TENG) with silk-fibroin patches film via spray-coating process. *Nano Energy*. 2017; 41:359-366. DOI: 10.1016/j.nanoen.2017.09.038
68. Domingos I., Neves A.I.S., Craciun M.F., Alves H. Graphene Based Triboelectric Nanogenerators Using Water Based Solution Process. *Frontiers in Physics*. 2021; 9. DOI: 10.3389/fphy.2021.742563
69. Keel E., Ejaz A., Mckinlay M., Garcia M.P., Caffio M., Gibson D. et al. Three-dimensional graphene foam based triboelectric nanogenerators for energy systems and autonomous sensors. *Nano Energy*. 2023; 112:108475. DOI: 10.1016/j.nanoen.2023.108475
70. Pan R., Xuan W., Chen J., Dong S., Jin H., Wang X. et al. Fully biodegradable triboelectric nanogenerators based on electrospun polylactic acid and nanostructured gelatin films. *Nano Energy*. 2018; 45:193-202. DOI: 10.1016/j.nanoen.2017.12.048
71. Gu L., German L., Li T., Li J., Shao Y., Long Y. et al. Energy Harvesting Floor from Commercial Cellulosic Materials for a Self-Powered Wireless Transmission Sensor System. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021; 13(4):5133-5141. DOI: 10.1021/acsami.0c20703
72. Mappoli S., Ghosh K., Pumera M. Multi-material 3D printed smart floor tiles with triboelectric energy generation and security monitoring. *Virtual and Physical Prototyping*. 2025; 20(1). DOI: 10.1080/17452759.2025.2457580
73. Huang J., Li D., Wu G., Hu W., Tan S., Zhao Z. et al. Yarn-based smart cement composite for self-sensing and energy harvesting in civil infrastructure. *Composites Part B: Engineering*. 2026; 312:113270. DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.113270
74. Yuan Y., Cai J., Xi X., Ukrainczyk N., Wang Y., Pei Z. et al. Advancing the Mechanical and Thermoelectric Properties of Geopolymers for Sustainable Architecture. *Small*. 2025; 21(32). DOI: 10.1002/smll.202408048
75. Prouskas C., Mourkas A., Zois G., Lidorikis E., Patsalas P. A New Type of Architecture of Dye-Sensitized Solar Cells as an Alternative Pathway to Outdoor Photovoltaics. *Energies*. 2022; 15(7):2486. DOI: 10.3390/en15072486
76. Fu M., Yuan Y., Liu X., Sun Z., Hu F., Luo C. et al. A Thermosensitive Ionic Hydrogel for Thermotropic Smart Windows With Integrated Thermoelectric Energy Harvesting Capability. *Advanced Functional Materials*. 2025; 35(1). DOI: 10.1002/adfm.202412081

Received January 9, 2025.

Adopted in revised form on January 19, 2026.

Approved for publication on January 29, 2026.

BIONOTES: Balasubramanian Kandasubramanian — Additive Manufacturing Laboratory, Department of Metallurgy and Materials Science; Defence Institute of Advanced Technology; Pune, Girinagar, Maharashtra, 411025, India; meetkbs@gmail.com.