НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ
ЧАСТЬ 3

О.Л. Фиговский [1], А.З. Штейнбок [2]

[1] Академик, Израильская ассоциация изобретателей, Хайфа. Израиль, figovsky@gmail.com

[2] PhD, Израильская ассоциация изобретателей, Хайфа. Израиль; Колледж Шенкар, Рамат-Ган, Израиль, shteinbok.arkady@gmail.com

Крупнейший в мире 3D-принтер строит уютные дома из дерева
Эми Гуния, CNN 3 июня 2024 г.

Университет штата Мэн, Центр передовых структур и композитов

В конце 2022 года Центр передовых структур и композитов Университета штата Мэн (ASCC) представил “BioHome3D”, односемейный дом площадью 600 квадратных футов, который, по его словам, является первым в мире домом, напечатанным на 3D-принтере и полностью изготовленным из биоматериалов. Нажмите на галерею, чтобы увидеть дом изнутри.

Рис. 34. BioHome3D - деревянный дом созданный с 3DP (2022, Университет штата Мэн) - вид комнаты

Рис. 35. BioHome3D - деревянный дом созданный с 3DP

По всему миру построены десятки домов, напечатанных на 3D-принтере – для размещения семьи в американском штате Вирджиния или членов бедной общины в сельской Мексике. Крупнейший в мире район, напечатанный на 3D-принтере, в настоящее время строится недалеко от Остина, штат Техас.

Согласно отчету, опубликованному в прошлом году тремя агентствами штата, эта технология может быть особенно полезна в таком месте, как американский штат Мэн, где к 2030 году потребуется около 80 000 новых домов для решения проблемы дефицита.

По всему миру построены десятки домов, напечатанных на 3D-принтере — для размещения семьи в американском штате Вирджиния или членов бедной общины в сельской Мексике. Крупнейший в мире квартал, напечатанный на 3D-принтере, в настоящее время строится недалеко от Остина, штат Техас.

Согласно отчету, опубликованному в прошлом году тремя агентствами штата, эта технология может быть особенно полезна в таком месте, как американский штат Мэн, которому к 2030 году потребуется около 80 000 новых домов для решения проблемы нехватки жилья.

“The approach we’ve taken is quite different from what you’ve seen, and you’ve been reading about for years,” he says.

Рис. 36. BioHome3D - деревянный дом созданный с 3DP - вид входа и кухни

Рис. 37. BioHome3D - деревянный дом созданный с 3DP - вид комнат

Рис. 38. Вид из нутри BioHome3D (2022) - вид комнат

Дом каждые 48 часов

В последние годы 3D-печать использовалась для строительства всего: от предприятий до мостов и мечетей. Одна некоммерческая организация даже работает над типографскими школами в зоне боевых действий. Дубай в Объединенных Арабских Эмиратах занесен в Книгу рекордов Гиннеса как самое

большое в мире сооружение, напечатанное на 3D-принтере, и стремится к 2030 году построить 25% новых зданий с использованием технологии 3D-печати.

Подавляющее большинство современных методов печати основано на бетоне: роботизированная рука, оснащенная соплом, накладывает слой влажного бетона на нужную форму.

ASCC меняет сценарий. Его гигантский принтер и его предшественник, который в 2019 году был сертифицирован Guinness World Records как “крупнейший прототип полимерного 3D-принтера” — единственные принтеры, строящие дома из отходов древесины, говорит Дагер.

Технология уже опробована. В конце 2022 года университет представил “BioHome3D”, односемейный дом площадью 600 квадратных футов, который, по его словам, является первым в мире домом, напечатанным на 100% биологической основе и построенным на 3D-принтере из местного древесного волокна и материалов из биосмолы.

“Когда они делают бетон, они печатают только стены”, — говорит Дагер. Он добавляет, что пол, крыша и стены BioHome3D были напечатаны.

По его словам, бетонные дома также необходимо строить на месте. Это может быть проблематично, особенно во время снежной зимы в Новой Англии. “Когда погода портится в течение двух недель, вы не можете печатать”, — добавляет он.

ASCC, напротив, напечатала готовые модули в университете и соединила их вместе на месте, чтобы создать BioHome3D.

Никто никогда раньше не делал этого с такими материалами”.

Хабиб Дагер, исполнительный директор Центра перспективных структур и композитов Университета штата Мэн

Новый принтер может печатать объекты размером до 96 футов в длину, 32 фута в ширину и 18 футов в высоту и печатать со скоростью до 500 фунтов в час. Дагер говорит, что цель — напечатать 1000 фунтов материала за час. По его словам, при такой скорости он сможет воспроизвести BioHome3D за 48 часов.

Если они смогут достичь этой цели, их дома, напечатанные на 3D-принтере, будут “очень конкурентоспособны по сравнению с текущими затратами на жилищное строительство”, добавляет он.

Но обрабатывать древесные материалы на такой высокой скорости может быть затруднительно. Даже рекордные принтеры ASCC иногда застревают. Например, при печати BioHome3D принтер перестал работать из-за скопления пыли. “Никто никогда раньше не делал этого с такими материалами”, — говорит Дагер.

Теплые деревянные полы и стены BioHome3D придают ему вид элегантного современного бревенчатого домика в скандинавском стиле.

“Многие люди считают, что бетон — это холодная вещь, и это не обязательно то место, где вы хотите жить”, — говорит Дагер. Однако BioHome3D “очень теплый и привлекательный”.

Сначала нужно преодолеть некоторые препятствия. “На изменение норм требуются годы”, — говорит Дагер, имея в виду строительные нормы, которым должны соответствовать строительные компании.

Одним из больших преимуществ метода является то, что когда дом больше не нужен, его можно снести и использовать для печати чего-то другого из его

материала. ASCC использует древесные отходы лесопилок штата Мэн в своих исследованиях и рассматривает возможность расширения производства с использованием этих местных побочных продуктов.

Тысячи людей осмотрели прототип в университетском городке Ороно, штат Мэн, и Дагер говорит, что это редкий случай, когда посетитель не спрашивает: “Когда я смогу его получить?”

“Мы слышим: “Знаете, я ухожу на пенсию и хочу сократить штат”. Могу ли я построить у себя одну из них?”, — говорит Дагер.

Принтер не заменит традиционное жилищное строительство, но в будущем дома, напечатанные на 3D-принтере, вероятно, будут составлять большую долю мирового жилищного фонда, прогнозирует он.

ASCC сейчас работает над тем, как включить в процесс печати кабелепроводы и водопроводные трубы “именно там, где этого хочет архитектор”, — добавляет он.

Следующий крупный проект типографии — это район из девяти домов для бездомных. ASCC сотрудничает с местной неправительственной организацией для проектирования конструкций, а печать планируется начать в 2025 году.

Плюсы 3D-печати в архитектуре

Архитекторы все чаще прибегают к услугам 3D-печати для улучшения своих рабочих процессов. Он также стал доступным, но мощным инструментом, который расширяет их возможности и способствует инновациям. 3D-печать предлагает архитекторам несколько явных преимуществ, в том числе:

Быстрое прототипирование: позволяет архитекторам быстро создавать физические прототипы, способствуя инновациям и итеративным процессам проектирования.

Кастомизация и персонализация: предлагает уникальные возможности для создания индивидуальных архитектурных элементов, повышая персонализацию дизайна.

Сокращение времени и затрат на строительство: оптимизирует строительные процессы, снижает затраты на рабочую силу и материальные отходы, а также продвигает методы устойчивого строительства.

Минусы 3D-печати в архитектуре

Несмотря на свои выдающиеся преимущества и возможности, 3D-печать в архитектуре, как и любая новая технология, также сталкивается с определенными ограничениями и проблемами, которые необходимо учитывать.

Высокие затраты. Первоначальные инвестиции в оборудование для 3D-печати могут быть значительными, что представляет собой проблему для малого бизнеса или отдельных архитекторов.

Нехватка квалифицированной рабочей силы. Отрасль сталкивается с нехваткой подготовленных специалистов, разбирающихся в технологиях 3D-печати, что влияет на ее более широкое внедрение.

3D-печать в архитектуре 2024

В 2024 году 3D-печать в архитектуре произведет революцию в дизайне благодаря устойчивым практикам, сложной геометрии, экономически эффективным городским решениям, сохранению наследия и созданию индивидуальных пространств, одновременно интегрируя интеллектуальные технологии и способствуя сотрудничеству в сфере образования.

Архитекторы творчески используют эту технологию в своей повседневной работе, особенно при создании прототипов, предложении дизайнерских идей и повышении общей эффективности.

Пример дигитального моделирования здания

Рис. 39. Масштабная модель дома, напечатанная на 3D-принтере (Фото: R3DPrints)

3D-печать широко используется для создания физических моделей архитектурных проектов. В отличие от традиционных двумерных представлений, таких как чертежи и чертежи, модели, напечатанные на 3D-принтере, обеспечивают реалистичное трехмерное представление предлагаемой конструкции. Эти модели позволяют архитекторам визуализировать и понять больше о проекте до фактического строительства, как, например, этот напечатанный на 3D-принтере район в Техасе.

3D-печать позволяет воссоздать самые сложные элементы дизайна без ущерба для точности (Фото: R3DPrints)

Рис. 40. Напечатанная модель

Повышение эффективности рабочего процесса

Помимо демонстрации общих концепций дизайна, 3D-печать можно использовать для выделения конкретных элементов дизайна и сложных деталей, превращая презентации из простых презентаций в захватывающие впечатления. От демонстрации инновационных структурных компонентов до демонстрации уникальных материалов отделки — модели, напечатанные на 3D-принтере, обеспечивают уровень детализации, который невозможно передать в цифровых презентациях.

3D-печать позволяет быстро создавать прототипы, позволяя архитекторам быстро создавать физические модели своих проектов. Это облегчает итеративные процессы проектирования, благодаря которым архитекторы могут быстро визуализировать, оценивать и совершенствовать свои проекты на основе отзывов клиентов. Модели, напечатанные на 3D-принтере, оптимизируют планирование строительства, обеспечивая точную детализацию конструкции, что сводит к минимуму задержки и сокращает отходы.

Выбор 3D-принтеров для архитектуры

Для создания архитектурных моделей доступны различные технологии 3D-печати, каждая из которых имеет свои сильные и слабые стороны. Эти специализированные принтеры предлагают множество преимуществ, которые улучшают процесс проектирования, улучшают результаты проектов и способствуют устойчивому развитию архитектуры. Некоторые из наиболее часто используемых технологий включают в себя:

Моделирование наплавленным осаждением на основе нитей (FDM): FDM — это универсальная и доступная технология, в которой пластиковые нити используются для создания моделей слой за слоем. Он особенно хорошо подходит для создания крупномасштабных моделей.

Стереолитография на основе смолы (SLA): SLA позволяет создавать высокодетализированные и точные модели с гладкой поверхностью. Он идеально подходит для создания сложных моделей с мелкими деталями.

Селективное лазерное спекание на основе порошка (SLS): SLS использует лазер для спекания мелких частиц порошка, создавая прочные и долговечные модели. Его часто используют для создания моделей, требующих структурной целостности.

Binder Jetting предлагает архитекторам несколько явных преимуществ, что делает его привлекательным выбором для создания архитектурных моделей, прототипов и даже полномасштабных конструкций:

Поскольку технология 3D-печати продолжает развиваться, а ее применение расширяется, ожидается, что она будет играть все более важную роль в формировании будущего архитектуры. Более того, 3D-печать может изменить архитектурную практику, сделав проекты более эффективными, устойчивыми и высококачественными.

Обеспечивая возможность изготовления на месте, минимизируя отходы материала и оптимизируя структурную целостность, 3D-печать в архитектуре может снизить затраты на строительство, минимизировать воздействие на окружающую среду и повысить долговечность зданий.

Обеспечение процессов эффективного возведения бетонных конструкций различной функциональности в строительстве.

Бетонные конструкции – это большая группа строительных материалов, обладающих высокой прочностью и долговечностью. Однако в чистом виде его нельзя использовать для изготовления габаритных изделий. Армирование металлом повышает устойчивость к деформациям, прочность и долговечность конструкции. Именно поэтому возведение современных строительных объектов невозможно осуществить без применения бетонных и железобетонных конструкций. Изделия из железобетона – прочные и надежные конструкции, применяемые в разных видах строительства. Многообразие изделий обусловлено широкой сферой применения, особенностями конструкции, материалами. Для изготовления используют разные виды бетона – ячеистые, лёгкие, тяжёлые, особо тяжёлые, жаростойкие, декоративные, стойкие к химическим воздействиям. По виду армирования – предварительно напряженные изделия и ненапряженные.

Классификация железобетонных конструкций по форме выглядит следующим образом:

- линейные – балки, прогоны, колонны;
- блочные, предназначенные для изготовления фундамента и возведения стен;
- пространственные – кольца колодцев, трубы;
- плоскостные – плиты, перегородки.

Изделия из железобетона применяют при строительно-монтажных работах в гражданском, энергетическом, промышленном, железнодорожном строительстве для возведения стен, фундаментов, перекрытий, мостов, опор линий электропередачи (ЛЭП) и многого другого.

Охарактеризуем основные виды железобетонных конструкций:

- монолитные изделия используют при жилищном строительстве. Они ускоряют возведение всех видов зданий и сооружений;
- сборные железобетонные конструкции доставляют в готовом виде со строительного комбината. Основное преимущество – возможность проведения строительных работ в любое время года;
- железобетонные плиты используют для создания перекрытий в жилых зданиях.

Для перекрытия производственных цехов используют бетонные фермы. Железобетонные конструкции в виде ригелей и балок – опоры, размещённые в определённых местах возводимого строения. При строительстве здания на слабых грунтах используют железобетонные сваи, обеспечивающие устойчивость сооружения. Для увеличения долговечности и надежности ЛЭП применяют стойки. Основные несущие элементы каркаса здания – колонны, имеющие прямоугольное или квадратное сечение.

Отметим основные преимущества железобетонных конструкций:

- высокая прочность, возможность эксплуатации в регионах с высокой сейсмичностью;
- стойкость к воздействию влаги, растворов кислот и щелочей;
- долговечность;
- морозостойкость;
- огнестойкость;
- технологичность – возможность изготавливать путем заливки изделия сложной формы;
- высокая скорость проведения строительных работ;
- низкая цена.

Сочетание этих качеств позволило железобетонной продукции занять лидерские позиции среди строительных материалов. Основной недостаток – высокая масса. Она увеличивает расходы на транспортировку и монтаж, требует затрат на усиление основы сооружения.

Эффективность возведения бетонных конструкций различной функциональности связана с обеспечением прочности бетона, которая, в свою очередь, зависит от состава исходного сырья – цемента, песка, гравия. Большое значение имеют пористость и плотность строительного материала. Бетон имеет невысокую теплопроводность, железобетонные конструкции переносят длительный нагрев, поэтому их используют для возведения промышленных объектов. Важная характеристика железобетонных конструкций – морозоустойчивость, способность выдержать многочисленные замерзания и оттаивания без ухудшения качества. Недостаток бетона – невысокое сопротивление растяжению.

Возведение железобетонных конструкций различной функциональности с использованием технологии фибробетонов связано с активным использованием стекло-, органо- и минеральных волокон, как новейших добавок к железобетону, значительно повышающих прочность и долговечность конструкций. Волокна способствуют повышению устойчивости бетона к растрескиванию, тепловому расширению и вибрации, продлевая срок службы и уменьшая необходимость в будущем обслуживании.

Армирование фибробетоном железобетонных колонн может изменить осевое напряженное состояние бетона на трехмерное напряженное состояние и улучшить несущую способность и деформационную способность замкнутого бетона. Результаты практического использования фибробетона при возведении бетонных конструкций различной функциональности показывают, что железобетонные колонны, укрепляющие углепластиковую ткань, обладают характеристиками простой конструкции, сильной коррозионной стойкостью, хорошим сдерживающим эффектом и практически не требуют обслуживания. Когда железобетонные колонны подвергаются осевому сжатию, стержни вызывают боковое расширение с очень малым предельным значением. Например, вокруг элементов могут быть созданы поперечные ограничения, чтобы предотвратить такое боковое расширение сжимающих элементов, чтобы улучшить способность элементов к сжатию и

деформации. Возведение бетонных конструкций различной функциональности по технологии создания фибробетонов - идеальный выбор для проектов, подвергающихся суровым условиям окружающей среды, или для использования в крупных конструкциях, таких, как мосты и башни.

Рис. 41. Возведение железобетонной колонны из фибробетона на основе углеродного волокна

Кроме того, 3DP позволяет легко интегрировать другие современные технологии. Например, "умный" бетон. Концепция “умного” бетона основана на интеграции технологий зондирования и мониторинга в железобетонные конструкции для предоставления точной информации об их состоянии и характеристиках. Датчики, встроенные в бетон, используются для измерения давления, напряжения, температуры и влажности, что помогает отслеживать и оценивать потенциальные повреждения и изменения в конструкции. Этот тип бетона способствует повышению безопасности, устойчивости и снижению затрат на техническое обслуживание в долгосрочной перспективе.

Используя передовые технологии, подрядные организации могут контролировать состояние бетона и прогнозировать любую потенциальную проблему до ее возникновения, предоставляя возможность принять превентивные меры и снизить затраты, возникающие в результате ремонта повреждений.

Датчики, встроенные в “умный” бетон, разнообразны и включают в себя множество устройств и систем, таких, как:

- Датчики давления: используются для измерения давления бетона и его распределения во времени. Эти датчики устанавливаются в бетон для отслеживания любых изменений напряжения, что помогает обнаружить потенциальные трещины или трещины существующие.
- Датчики растяжения: они измеряют прочность бетона на растяжение и определяют любые изменения напряжения с течением времени. Эти

датчики можно использовать для раннего обнаружения разрушения конструкции или чрезмерной нагрузки на бетон.

- Датчики температуры: используются для контроля температуры бетона в процессе затвердевания. Эти датчики позволяют выявлять любые изменения температуры, которые могут повлиять на прочность и долговечность железобетона.
- Датчики влажности: используются для измерения уровня влаги в бетоне, поскольку высокое содержание влаги может повлиять на прочность и долговечность бетона. Мониторинг влажности помогает выявить любые потенциальные проблемы, связанные с коррозией или износом.

Когда данные датчиков собираются, их можно передать в системы мониторинга для анализа и интерпретации. Анализ данных можно использовать для обнаружения необычных закономерностей и изменений в структуре.

Актуальным направлением “умных” технологий возведения бетонных конструкций различной функциональности является использование сплавов с памятью формы (Shape memory alloy-SMA). SMA представляют собой функциональные материалы для возведения бетонных конструкций, которые могут проявлять большие деформации в процессе нагружения-разгрузки без остаточной деформации. Они обладают способностью запоминать заданную форму даже после сильной деформации. Возведение бетонных конструкций различной функциональности связано с использованием SMA в качестве датчиков, исполнительных механизмов, пассивных рассеивателей энергии, ограничителей для мостовых конструкций и демпферами для контроля формы и вибрации строительных конструкций.

SMA-ограничители мостовых соединений при возведения бетонных конструкций различной функциональности — это элементы, которые обычно используются для соединения двух соседних пролетов или рам мостов и предотвращения их больших относительных смещений во время землетрясений. Сверхэластичные SMA могут использоваться в качестве демпфирующих элементов или потенциальных сейсмозащитных устройств для мостов. На рис. 2 показаны сверхэластичные ограничительные стержни SMA диаметром 25,4 мм, используемых для сейсмической модернизации многопролетных опорных мостов. Ограничитель SMA более эффективно уменьшает относительное шарнирное смещение опоры и обеспечивает больший диапазон упругих деформаций по сравнению с обычными стальными ограничительными тросами. Кроме того, ограничитель SMA чрезвычайно ограничивает реакцию покрытия моста на движение грунта в ближней зоне. Повышенная жесткость ограничителей SMA при больших нагрузках обеспечивает дополнительную фиксацию для ограничения относительных отверстий в мосту.

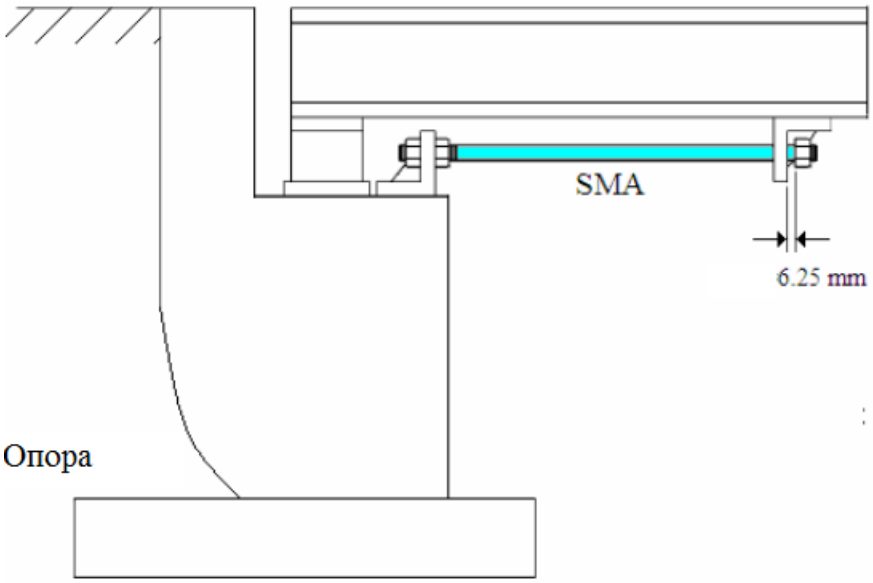

Рис. 42. Схема установки фиксатора SMA для простоопорного моста.

Также, при возведения бетонных конструкций различной функциональности, используются крепления SMA. Крепления SMA были разработаны для обеспечения демпфирования и выдерживания относительно больших деформаций. Предложен колонный фундамент открытого типа с креплением SMA для обеспечения сейсмостойкости – рис. 3а. Крепления SMA изготовлены из нитиноловых стержней SMA диаметром 20–30 мм и стальных стержней, как показано на рисунке 3б.

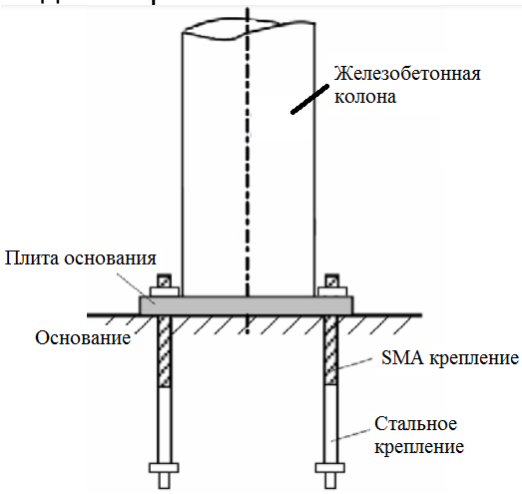

Рис. 43. Схема: (а) и внешний вида, (б) SMA-крепления стержня для колонны

Результаты, полученные в результате испытаний на пульсирующую растягивающую нагрузку и численного моделирования крепления SMA, показали, что крепление SMA очень эффективно рассеивают энергию и снижают вибрацию здания при сильных сейсмических движениях грунта. Кроме того, анкерные крепления SMA могут восстанавливать свою первоначальную форму после циклических нагрузок, поэтому их характеристики сопротивления остаются неизменными, что позволяет предотвратить пластическую деформацию и повреждение несущих колонн

Кроме того, разработаны и другие приемы улучшения механических и прочностных свойств бетонных конструкций различной функциональности. Эти методы включают использование улучшенных химических добавок и современных

инструментов для формовки, армирования и отделки. Эти методы улучшают характеристики бетона по сопротивлению напряжениям, растяжению, изгибу и истиранию, что способствует увеличению срока службы конструкций и сокращению технического обслуживания в будущем.

Другой пример – Индия. Techno International New Town (TINT), уважаемое образовательное учреждение в Индии, признает важность этой тенденции и стремится вооружить будущих инженеров-строителей необходимыми знаниями и навыками. Благодаря комплексной учебной программе и отраслевому подходу TINT гарантирует, что его студенты останутся в авангарде новых технологий.

Techno International New Town (TINT) стремится предложить комплексное образование и сформировать следующее поколение инженеров-строителей. Акцент института на практическом обучении и практическом обучении идеально соответствует требованиям развивающейся строительной отрасли. Современное оборудование и опытные преподаватели TINT предоставляют студентам благоприятную среду для изучения и внедрения инноваций в области гражданского строительства, включая революционную сферу 3D-печати.

Развивая культуру инноваций и внедряя новейшие технологии, Techno International New Town (TINT) открывает путь начинающим инженерам-строителям к тому, чтобы стать первопроходцами в строительной отрасли. Благодаря 3D-печати, способной изменить то, как мы строим, TINT выступает в качестве маяка передового опыта, готовя студентов формировать будущее, в котором сливаются эффективность, устойчивость и креативность.

В заключение отметим, что недавняя тенденция использования 3D-печати в гражданском строительстве представляет собой сдвиг парадигмы в методах строительства. От ускорения сроков строительства и снижения затрат до повышения гибкости и устойчивости дизайна — 3D-печать готова переопределить способы создания конструкций. По мере того, как мир осваивает эту революционную технологию, такие учреждения, как Techno International New Town (TINT), играют жизненно важную роль в формировании компетентных профессионалов, которые будут продвигать будущее гражданского строительства.

Заключение

Учитывая преимущества 3D-печать, можно смело сказать, что это революция в строительстве

Рис. 44. Использование 3D-печати в гражданском строительстве
(*Techno International New Town (TINT), Индия)*

Перечислим некоторые особенности и преимущества метода.

1. Более быстрое и эффективное строительство. Одним из основных преимуществ 3D-печати в гражданском строительстве является ее способность ускорять процесс строительства. Традиционные методы часто включают в себя трудоемкие задачи, такие как создание опалубки и установка арматуры. С помощью 3D-печати сложные конструкции можно строить слой за слоем, сводя к минимуму необходимость ручного труда и значительно сокращая время строительства.
2. Снижение затрат: оптимизируя использование материалов и устраняя отходы, 3D-печать предлагает экономически эффективные решения для проектов гражданского строительства. Возможность точной печати сложных конструкций гарантирует эффективное использование ресурсов, что в конечном итоге снижает затраты на строительство. Кроме того, 3D-печать позволяет производить продукцию на месте, сокращая транспортные расходы и повышая общую доступность проекта.
3. Гибкость настройки и дизайна. Универсальность 3D-печати позволяет архитекторам и инженерам создавать уникальные и индивидуальные проекты, которые раньше было трудно достичь с помощью традиционных методов. Эта технология позволяет с легкостью создавать конструкции сложной геометрии, замысловатой детализации и даже изогнутые конструкции. В результате архитекторы могут расширить границы творчества, создавая более эстетически привлекательные и функциональные проекты.
4. Устойчивость. Воздействие строительства на окружающую среду уже давно вызывает обеспокоенность. Однако 3D-печать в гражданском строительстве

предлагает устойчивые решения. Используя пригодные для вторичной переработки и экологически чистые материалы, сокращая отходы материалов и минимизируя потребление энергии в процессе строительства, 3D-печать соответствует целям устойчивого развития и способствует более экологичному будущему.

Библиография

1. Digital Building Technology (DBT) https://dbt.arch.ethz.ch/project/3d-printed-formwork-for-hires-concrete-slab/
2. Революция в гражданском строительстве: последняя тенденция 3D-печати https://tint.edu.in/trend-of-3d-printing.html
3. ‘World’s first on-site 3D printing of apartment building’ begins https://bkt.tradelinkmedia.biz/publications/7/news/2538
4. Куприяновский В.П., Покусаев О.Н., Намиот Д.Е., Климов А.А., Жабицкий М.Г. Цифровой бетон: открытый BIM, машиночитаемые стандарты, IOT, цифровые двойники, логистика 4.0, бережливое строительство и другие промышленные подходы на примерах транспортных инфраструктур // International Journal of Open Information Technologies. 2021. №9. URL: cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoy-betonotkrytyy-bim-mashinochitaemye-standarty-iot-tsifrovye-dvoyniki-logistika-4-0- berezhlivoe-stroitelstvo-i-drugie (дата обращения: 17.04.2024). http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_17N6y24_Tamov1.pdf_903dfd177e.pdf
5. Обеспечение процессов эффективного возведения бетонных конструкций различной функциональности в строительстве [24], Р.М. Тамов , Кубанский государственный технологический университет, http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_17N6y24_Tamov1.pdf_903dfd177e.pdf
6. 3D printing in construction: is it worth the hype? https://www.ucem.ac.uk/whats-happening/articles/3d-printing-construction/