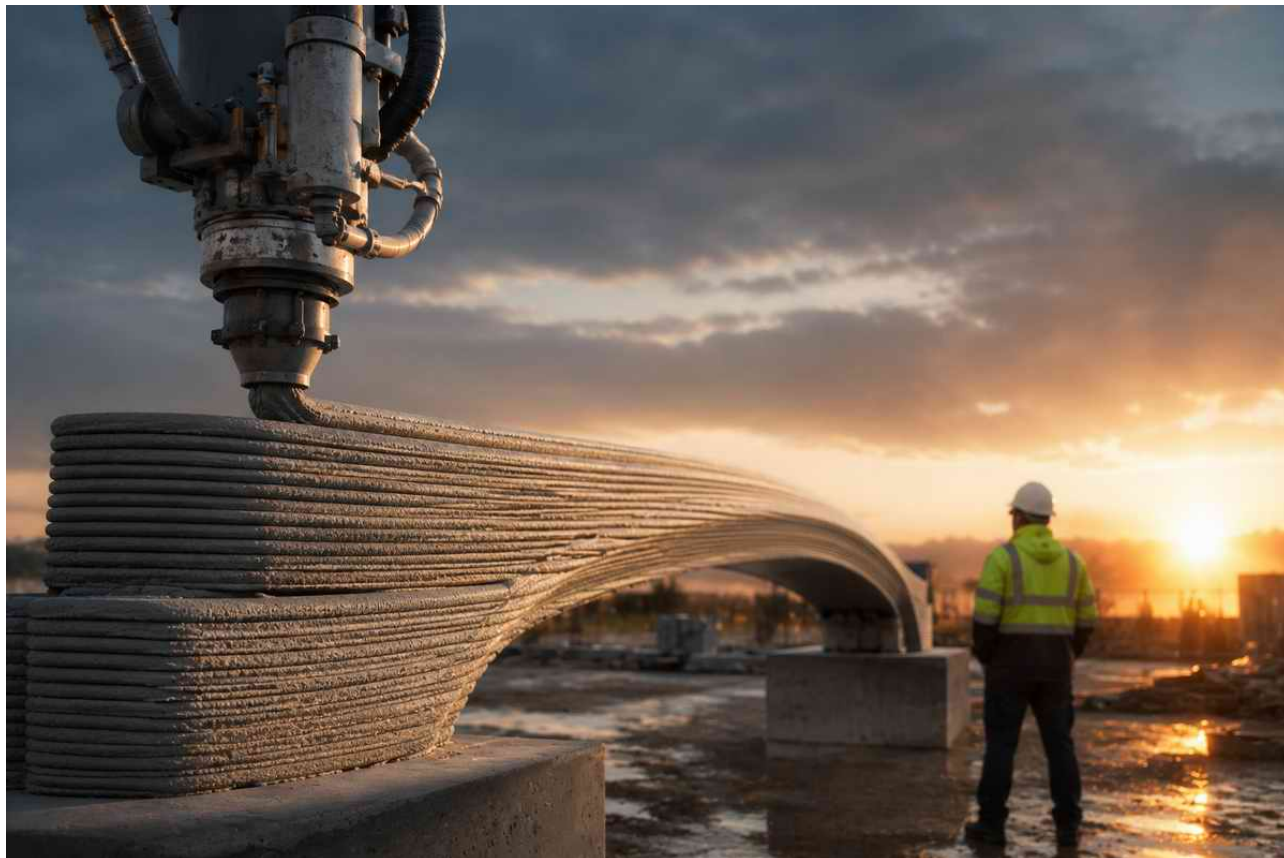


Напечатанный на 3D-принтере бетонный мост показал, как технологии могут сократить расход материалов и выбросы CO₂



Дата публикации: 20.07.2026

Бетон остается самым распространенным строительным материалом в мире, однако именно его производство считается одним из крупнейших источников выбросов углекислого газа. По различным оценкам, цементная промышленность формирует значительную долю глобальных антропогенных выбросов CO₂, поэтому поиск способов уменьшить расход бетона давно стал одной из ключевых задач современной строительной науки. Одним из наиболее перспективных направлений считается крупномасштабная 3D-печать бетонных конструкций, которая позволяет укладывать материал только там, где он действительно необходим для обеспечения прочности, практически полностью отказаться от традиционной опалубки и значительно сократить строительные отходы.

Несмотря на впечатляющий прогресс аддитивных технологий, инженеры долгое время сталкивались с серьезной проблемой. Компьютерные алгоритмы способны создавать чрезвычайно эффективные конструкции, используя методы топологической оптимизации. Такой подход позволяет определить форму

объекта, которая выдерживает заданную нагрузку при минимальном расходе материала. Однако полученные математические модели зачастую оказываются настолько сложными, что существующие строительные 3D-принтеры просто не способны их воспроизвести.

Причина заключается в технических ограничениях оборудования. Современные бетонные принтеры работают с относительно широкими соплами, не могут выполнять слишком резкие повороты, а также требуют непрерывной укладки материала без многочисленных остановок. В результате идеально рассчитанная конструкция нередко требует длительной ручной доработки или вовсе оказывается непригодной для изготовления.

Исследователи Массачусетского технологического института предложили новый подход, позволяющий устранить этот разрыв между математической оптимизацией и реальными возможностями строительной техники. Результаты работы опубликованы в журнале Additive Manufacturing и демонстрируют, что ограничения оборудования можно учитывать уже на этапе компьютерного проектирования, а не после завершения расчетов.

Вместо создания сначала максимально эффективной формы с последующей адаптацией под принтер ученые сразу включили технические параметры оборудования в математическую модель. При разработке алгоритма учитывались сразу несколько факторов: ширина экструдированного бетонного слоя, допустимый угол поворота печатающей головки, непрерывность траектории движения сопла и особенности послойного формирования конструкции. Такой подход позволил получать проекты, практически полностью готовые к печати без дополнительной ручной переработки.

Для проверки новой методики инженеры разработали и изготовили бетонный мост длиной около 2,3 метра. На печать конструкции ушло примерно полчаса, при этом использовался стандартный строительный раствор без специальных экспериментальных материалов. После завершения изготовления мост прошел серию механических испытаний.

Конструкция массой около 410 килограммов выдержала нагрузку более 910 килограммов, равномерно распределенную по всей поверхности. Во время испытаний практически не наблюдалось заметного прогиба, а реальные результаты почти полностью совпали с расчетами компьютерной модели. Такое совпадение подтвердило высокую точность нового метода проектирования и показало, что математическая модель достаточно точно описывает поведение конструкции под нагрузкой.

Однако самым интересным оказался другой вывод исследования. Анализ

показал, что главным ограничением эффективности сегодня является уже не прочность самого бетона, а возможности существующего оборудования для 3D-печати. Другими словами, современные принтеры пока не позволяют полностью реализовать потенциал вычислительной оптимизации, хотя сами строительные материалы способны работать значительно эффективнее.

Чтобы определить наиболее критичные параметры оборудования, ученые проанализировали влияние каждого технологического ограничения на общий расход материала. Оказалось, что решающую роль играет вовсе не непрерывность печати или сложность траектории движения сопла, как предполагалось ранее, а ширина наносимого бетонного слоя.

При изготовлении экспериментального моста использовалась ширина экструдированного валика около четырех сантиметров. Компьютерное моделирование показало, что уменьшение этого значения до одного сантиметра способно сократить расход бетона примерно на 76 процентов без ухудшения прочностных характеристик конструкции. Такой результат оказался неожиданным даже для самих авторов исследования и фактически сформировал технологическую дорожную карту для производителей строительных принтеров.

Полученные данные свидетельствуют, что сравнительно небольшие изменения конструкции печатающего оборудования способны многократно повысить эффективность использования материала. Это особенно важно для строительной отрасли, где даже незначительное сокращение расхода бетона на каждом объекте способно привести к существенному уменьшению выбросов углекислого газа в мировом масштабе.

Еще одной особенностью нового моста стало использование принципов работы бетона при сжатии. Этот материал обладает исключительно высокой прочностью на сжатие, однако значительно хуже переносит растягивающие нагрузки. Именно поэтому вся геометрия конструкции была рассчитана таким образом, чтобы каждый ее элемент работал преимущественно на сжатие.

Во время испытаний такой подход полностью оправдал себя. Однако после завершения тестов рабочие попытались немного приподнять один из углов моста для уборки площадки. Возникшая при этом растягивающая нагрузка оказалась достаточной для разрушения конструкции. Этот эпизод стал не признаком недостаточной надежности разработки, а наглядной демонстрацией фундаментальных физических свойств самого бетона и высокой точности инженерных расчетов.

Авторы исследования считают следующим этапом развитие технологий армированного бетона для аддитивного строительства. В настоящее время

специалисты работают над интеграцией металлической арматуры непосредственно в процесс трехмерной печати. Решение этой задачи позволит объединить преимущества оптимизированной геометрии, высокой прочности железобетона и автоматизированного строительства.

Практическое значение разработки выходит далеко за рамки строительства мостов. Подобные технологии могут использоваться при возведении жилых зданий, инженерных сооружений, объектов транспортной инфраструктуры, промышленных комплексов и временных конструкций. Особенно перспективным направлением считается быстрое строительство после стихийных бедствий, когда необходимо в кратчайшие сроки восстановить дороги, переправы и другие объекты без изготовления сложной опалубки и доставки большого количества строительной техники.

Развитие вычислительных алгоритмов, методов топологической оптимизации, строительной робототехники, аддитивного производства, автоматизированного проектирования и интеллектуальных систем управления постепенно меняет саму философию строительства. Новое исследование показывает, что максимальный экологический эффект достигается не только благодаря совершенствованию строительных материалов, но и за счет объединения современных математических моделей с реальными возможностями оборудования. Именно такой подход способен сделать крупномасштабную 3D-печать бетона одной из ключевых технологий устойчивого строительства будущего.

Ссылка: «Влияние ограничений изготовления на топологически оптимизированные 3D-печатные бетонные конструкции» DOI: [10.1016/j.addma.2026.105283](https://doi.org/10.1016/j.addma.2026.105283).