

АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО БЕТОНА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПРОБЛЕМЫ 3D-ПЕЧАТИ

Алтухова Дарья Александровна

магистрант Белгородского Государственного Технологического Университета им. В.Г. Шухова, РФ, г. Белгород

Аддитивное производство набирает обороты в строительной отрасли. Потенциал для совершенствования существующих методов строительства весьма значителен. Одним из таких методов, изучаемых в настоящее время как в научных кругах, так и в строительной практике, является аддитивное производство бетона. Несмотря на неуклонно растущее число исследователей и частных предприятий, активно работающих в этой области, Аддитивное производство бетона (АПБ) все еще находится в зачаточном состоянии. Различные варианты в этом семействе методов производства постоянно разрабатываются и совершенствуются. Исследуется фундаментальное научное понимание отношений между конструкцией, материалом, процессом и продуктом. Коллективная работа в этой области по-прежнему весьма ограничена. После наброска потенциала АПБ для строительства в этой статье представлены варианты АПБ, разрабатываемые по всему миру, и далее подробно описывается один из них - объект 3D-печати бетона технологического университета Эйндховена. Он сравнивается с другими методами АПБ, а также с 3D-печатью в целом. Впоследствии в статье будут рассмотрены характеристики геометрии и структуры изделия 3D-печати, а также рассмотрены вопросы соотношения параметров и экспериментального исследования. Наконец, в нем будут представлены основные препятствия, которые стоят между потенциалом 3D-печати и крупномасштабным применением на практике, а также обсуждаться ожидаемая эволюция АПБ в целом.

1. Потенциал аддитивного производства бетона (АПБ)

Бетон - самый распространенный строительный материал во всем мире. Сырье для производства бетона дешево и легко доступно в большинстве мест на земном шаре. Он прочен (при сжатии), долговечен, огнеупорен и, благодаря своему жидкому состоянию перед схватыванием, может применяться практически в любой форме. Этот термин фактически обозначает широкий спектр композиционных моделей, общей характеристикой которых является то, что они состоят из наполнителя из песка, гравия или других гранулированных материалов, связанных матрицей, которая образуется в результате экзотермической реакции гидратации между цементными материалами (цементом или заменителями цемента, такими как летучая зола) и водой. Дополнительные или альтернативные добавки, примеси, заполнители и цементные материалы применяются для достижения таких специфических свойств, как самоуплотнение, высокая прочность, низкий уровень выбросов CO₂, пластичность и т.д. Значительный диапазон таких композиций известен и принят на практике; множество других вариантов исследуется вне практики.

Сегодня конструкционный армированный или предварительно напряженный бетон производится в ограниченном количестве способов. Как правило, он отливается в предварительно сконструированную форму, в которой перед литьем была установлена стальная арматура. Этот метод применяется как на месте, так и за его пределами. Последнее обеспечивает более высокие конкретные качества и контроль качества. В любом случае, это требует значительных трудозатрат как для пресс-формы, так и для позиционирования арматуры. Материал пресс-формы может часто использоваться повторно, но не всегда. Еще одним способом изготовления, применяемым к некоторым конкретным конструктивным элементам, является экструзия, например, для пустотелых плит перекрытия. В отличие от

Литейного бетона, экструзионный бетон требует быстрого схватывания и низкого падения, так как материал не поддерживается после выхода из экструзионной формы.

Несмотря на преимущества бетона как конструкционного материала, он также сталкивается с рядом проблем, которые получают все большее признание. Производство цемента очень энергоемко из-за сжигания шлака в печи для обжига. Как следствие, на производство бетона приходится значительный процент общемирового объема производства CO₂ (оценки и методы расчета различны, но сама цементная промышленность считает, что на производство цемента приходится 5% общемирового объема производства CO₂; Всемирный Деловой Совет по устойчивому развитию [WBCSD], 2002). Введение заменителей цемента, таких как летучая зола (побочный продукт доменной печи), привело к снижению среднего выхода CO₂, связанного с бетоном, но оно все еще является значительным. Тот факт, что бетонное сырье дешево, не стимулирует экономичное использование и, таким образом, затрудняет сокращение выбросов CO₂.

Еще одна основная проблема связана с физическим трудом, особенно для литого на месте бетона. Как монтаж пресс-форм, так и размещение арматуры по-прежнему требуют физически напряженного труда, особенно когда требуется специальная геометрия. Это приводит к тому, что у строительных рабочих возникают проблемы с личным здоровьем, которых следует по возможности избегать, особенно в условиях старения рабочей силы, как это происходит во многих развитых странах. Управление охраны труда и техники безопасности Министерства труда США перечисляет в качестве потенциальных опасностей для работников бетонной промышленности: раздражение глаз, кожи и дыхательных путей от воздействия цементной пыли; неадекватные защитные ограждения на оборудовании; неадекватные системы блокировки/маркировки на машинах; перенапряжение и неудобные позы; скольжения, спотыкания и падения; а также химические ожоги от влажного бетона (Управление охраны труда и техники безопасности; Министерство труда США [OSHA], 2004). Третья проблема, с которой сталкивается бетонная строительная отрасль, - это использование материалов. Помимо самих пресс-форм, необходимость их изготовления и низкая стоимость сырья препятствуют сложным конструктивно оптимизированным геометриям, но скорее отдают предпочтение геометрической простоте перед оптимальным использованием материала.

Новые методы аддитивного производства, такие как трехмерная (3D) печать, были исследованы для строительства бетона с середины 1990-х гг. в настоящей работе эти методы в общем обозначаются как АПБ, в то время как конкретные методы, разработанные различными предприятиями и исследовательскими группами, обозначаются именами, которыми обычно обозначают их сами операторы.

АПБ обладает потенциалом для решения проблем, стоящих перед бетонным строительством, описанным выше. Более того, это может сулить совершенно новый подход к дизайну. Поскольку печатающая головка постепенно создает полную структуру, вполне возможно, что состав и количество печатаемого материала могут быть параметрически изменены от одного места к другому в соответствии с конкретными местными требованиями.

2. Современные технологии АПБ

Новые проекты представляются на регулярной основе. Некоторые заслуживающие внимания примеры включают в себя (рис. 1):

Двухэтажный дом в Китае площадью 400 м², построенный пекинской компанией HuaShang Tengda в 2016 году (3dprint.com 2016b).

Офисное здание в Дубае, ОАЭ, площадью 250 м², 2016 год, китайская строительная компания Winsun. Здание было напечатано с помощью 3D-принтера размером 120 × 40 × 20 футов (приблизительно 36,6 × 12,2 × 6,1 м), оснащенного автоматизированной роботизированной рукой (Cnet.com 2016a, Mediaoffice.ae 2016).

Интерьер гостиничного номера размером 12,5 × 10,5 × 4 м, расположенного на Филиппинах, завершен 20 сентября 2015 года компанией Total Kustom (Totalkustom.com 2016a).

Пятиэтажный жилой дом в Сучжоу, Китай, построенный в январе 2015 года компанией Winsun (Cnet.com 2016b).

Кроме того, в Сучжоу, Китай, вилла площадью 1100 м², построенная компанией Winsun, была завершена в начале 2015 года.

Детский замок, Миннесота, США, завершен в августе 2014 года, Total Kustom (Totalkustom.com 2016b).

Серия из 10 домов, в Сучжоу, Китай, by Winsun, 2014. Печатается на массивном принтере размером 150 × 10 × 6,6 м (Wu et al. 2016).



Рисунок 1. Заслуживающие внимания примеры проектов с использованием АПБ: (а) двухэтажный дом в Китае HuaShang Тэнда, (б) офисного здания в Дубае от компании WinSun, (с) пятиэтажное здание в городе Сучжоу, Китай, компании WinSun, (д) отель люкс интерьер на Филиппинах, общая кустом, (е) дом в Сучжоу от компании WinSun, (ф) замок в Миннесоте, США, общая кустом, и (г) серия из 10 домов в городе Сучжоу по компании WinSun



Рисунок 2. 3D-бетонный принтер в действии. Бетон без спада оставляет сопло в виде относительно жесткой непрерывной нити накала

3. Вывод

АПБ был представлен как перспективное семейство методов для решения проблем, стоящих сегодня перед бетонным строительством, а также для открытия новых возможностей проектирования. Были проанализированы и сопоставлены различные варианты, а также широко внедрен метод 3DCP, применяемый Эйндховенским университетом. Введены геометрические и структурные характеристики, обусловленные составом из линейной непрерывной нити накала. Были обсуждены вопросы, касающиеся экспериментальных исследований. Наконец, были определены области исследований и разработок, позволяющие применять их на практике, и дана перспектива возможного развития этих технологий.

Список литературы:

1. AFGC-SETRA,, 2002. Сверхвысокие эксплуатационные характеристики армированных волокном бетонов. Промежуточные рекомендации. Банье: Сетра.
2. Колла, В. и Дини, Е., 2013. Крупномасштабная 3D-печать: от глубокого моря до Луны. В: д. Канеза, С. фонда, и М. Zennaro, ЭЦП. Недорогая 3D-печать для науки, образования и устойчивого развития. Триест: ICTP, 127-132.
3. Di Carlo, T., Khoshnevis, B., and Carlson, A., 2013. Экспериментальные и численные методы для характеристики структурных свойств свежего бетона.
4. Хван, Д. и Хошневис, Б., 2004. Изготовление бетонных стен методом контурного крафта. Доклад представлен на 21-м Международном симпозиуме по автоматизации и робототехнике в строительстве (ISARC 2004), Чеджу. [академия Google]
5. Хошневис, Б. и др., 2001. Контурная обработка - это многослойная технология изготовления. Специальный выпуск журнала IEEE Robotics and Automation Magazine, 8 (3), 33-42. doi: 10.1109 / 100.956812 [Crossref], [Web of Science ®], [Google Scholar]
6. Lim, S., et al., 2011. Разработка жизнеспособного конкретного печатного процесса. 28-й Международный симпозиум по автоматизации и робототехнике в строительстве (ISARC2011), 665-670. [академия Google]
7. Lim, S., et al., 2012. Развитие процессов аддитивного производства строительного масштаба. Автоматизация в строительстве, 21, 262-268. Дой: 10.1016/j.autcon.2011.06.010 [Crossref], [Web of Science ®], [Google Scholar]