

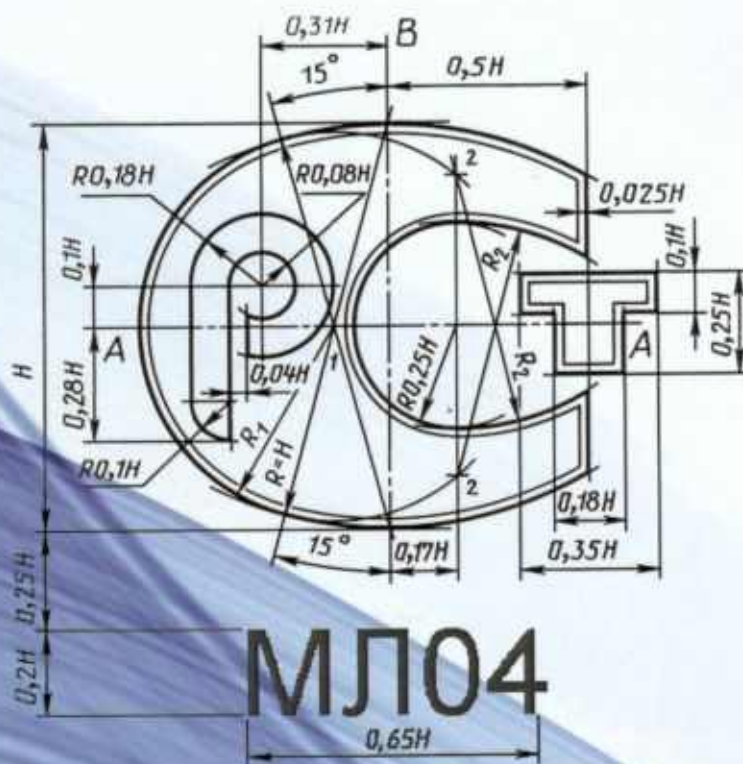


Институт пути, строительства
и сооружений

Издание включено в РИНЦ

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОТРАСЛЕВОЙ НАУКИ

Материалы
Всероссийской межвузовской конференции
с международным участием



Достаточно эффективным показал себя способ защиты берега путем создания искусственных бухт: врезкой в коренной берег. Но такой способ должен быть экономически оправдан, поскольку в этом случае происходит изъятие части суши, которая представляет собой определенную ценность. С этой точки зрения наиболее эффективным является способ создания искусственных бухт с помощью прерывистых волноломов.

Указанному принципу отвечают те же бермы, буны, больверки, волноломы и пр., выполненные из наброски природного камня. В отличие от своих железобетонных прототипов они более эффективно удерживают пляжеобразующий материал. Кроме того, при соответствующих конструктивных решениях, они могут быть гармонично вписаны в естественный природный ландшафт.

Выводы. Применение биопозитивных конструкций позволит решить задачи строительства берегоукрепительных сооружений, кроме того за счет увеличения площади обрастания численности водных организмов повысить качество морской воды. Проницаемые конструкции не нарушают водообмен и перенос наносов, и исключают образование застойных явлений. Однако для повышения эффективности работы гидротехнических сооружений необходимо проводить регулярные обследования состояния конструкций и их частичную зачистку, так как при длительной эксплуатации отверстия в сооружениях с перфорированной стеной сильно обрастают ракушками и водорослями.

Список использованных источников:

1. Артемьева А.М. Экологически опасные аспекты природно-хозяйственной деятельности в рекреационной зоне Автономной Республики Крым и пути повышения ее безопасности // Строительство и техногенная безопасность. – 2010. – Выпуск 33-34. – С. 196–205.
2. Зайцев В.А. Региональная схема инженерной защиты Черноморского побережья Крымской области и Горного Крыма. / В.А. Зайцев, А.И. Максимов, А.Т. Рыбалка. – Симферополь: «Укрюжгипрокоммунстрой» Крымский филиал, 1989. – 114 с.
3. Ивасюк А.Ю. Разработка и обоснование проницаемого вдольберегового берегозащитного сооружения // Строительство и техногенная безопасность. – 2010. – Выпуск 33–34. – С. 181–182.
4. Тетиор А.Н. Устойчивое развитие. Устойчивое проектирование и строительство. – М: «Природа», 1998. – 450 с.
5. Иваненко Т.А. Комплекс экологически безопасных решений застройки прибрежных рекреационных зон // Иваненко Т.А., Ветрова Н.М. // Проблемы экологии. – 2013. – №1(31). – С. 89-97.
6. Котова Е.В. Биопозитивность зданий и архифитомелиорация как современные тенденции в архитектуре / III Студенческая международная заочная научно-практическая конференция «Молодежный научный форум: Технические и математические науки». – г. Орёл. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://nauchforum.ru/node/939>
7. Мишин А.В. Волнозащита акваторий и берегов. – К.: ООО УИПК «ЕксОб», 2003. – 176 с.
8. Мишин А.В. Оригинальные ресурсосберегающие, технические решения в гидротехническом строительстве / А.В. Мишин, А.А. Кияница, Л.А. Кияница. – К.: ООО УИПК «ЕксОб», 2007. – 204 с.

Современные технологии 3D-печати в строительстве

Добшиц Л.М., д.т.н., профессор

Николаева А.А., аспирант

ФГБОУ ВО МГУПС МИИТ, г. Москва

Аннотация. В статье рассмотрены преимущества 3D-технологий в строительстве, возможность печати бетонных конструкций или отдельных элементов без использования опалубки. В статье рассматриваются существующие аддитивные технологии в строительстве, проведенные исследования и проекты по данной тематике.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-принтер, строительство, бетон.

Развитие технологии 3D-печати открывает новые возможности в различных областях деятельности: медицине, промышленности, и даже кулинарии. В строительной отрасли последние 10 лет проводятся исследования по изучению эффективного применения новых технологий, способных удовлетворить всем современным требованиям: автоматизации, индустриализации, информатизации и диверсификации. Главным преимуществом 3D-технологий в строительстве является возможность печати бетонных конструкций или отдельных элементов без использования опалубки. Такой автоматизированный подход предоставил бы не только архитектурную свободу, но и позволил бы существенно сократить сроки и себестоимость строительства, поскольку опалубочные работы представляют собой 35-60% от общей себестоимости [3]. Так же много

ры [1-3] отмечают, что в будущем именно такие автоматизированные системы изменят сферу производства в целом, позволят реализовывать проекты в сильно загрязненных и труднодоступных средах.

Существует несколько способов создания трехмерной конструкции с помощью использования технологий быстрого прототипирования (Рис.). Технологии вычитания (субтрактивные) представляют собой постепенное удаление материала из заготовки до создания объекта требуемой формы. Аддитивные технологии позволяют создавать объект послойным наращиванием материала. Так, к порошковым и жидким методам печати относятся: послойное экструдирование, селективное лазерное спекание, осаждения полужидкого материала, цифровая световая обработка, стереолитография и другие [4]. Все эти методы являются трехмерной печатью, поскольку позволяют создавать объемные объекты, но эта статья посвящена печати преимущественно с помощью 3D-принтера.

3D-печать представляет собой выдавливание быстротвердеющей рабочей смеси через сопло или экструдер. Сначала при помощи систем автоматизированного проектирования создается цифровая модель, после чего модель (CAD) преобразуется в формат стандартного языка моделирования (STL); файл STL разделяется на множество тонких цифровых слоев, содержащих геометрическую информацию, и передающихся принтеру в определенной последовательности. В соответствии с полученными данными принтер создает трехмерный объект.

Существует несколько видов конструкций 3D-принтеров. Это может быть как роботизированный манипулятор, так и конструкция в виде башенного крана, работающая в угловых координатах. В первом случае принтер может быть установлен в виде мостового крана, а на открытой площадке — конструкция козлового крана. Диаметры сопла или экструдера также варьируются.



Рисунок 1. Классификация технологий быстрого прототипирования [4]

За последнее десятилетие были проведены исследования различных технологий 3D-печати. Одним из самых известных проектов стал «ContourCraft» (CC), разработанный профессором Khoshnevis в университете Южной Калифорнии в США [5]. Проект основывается на экструзии двух слоев жидкого материала для создания опалубки. Поверхности сглаживаются шпателем по мере заливки бетонных слоев. Печатающая головка установлена на мостовой кран, поскольку кран предназначен для стационарных строительных работ. У этой системы существуют недостатки: ограничение вертикальной экструзии (2,5D-технологии); совместное использование бетона и опалубки довольно сложно для реализации в производстве; зависимость от размера и сложности печати объекта. Кроме того, при прерывании последовательного литья бетона в опалубку, гидростатическое давление и слабые механические свойства экструдированного цемента способствуют появлению ослабленных межфазных зон между слоями, что доказано экспериментально [6].

С 2005 года Басуэлл и его коллеги из университета Лафабро в Великобритании проводят программу «Бетонная 3D-печать», направленную на автоматизацию строительства [4].

Печатающая головка для нанесения вяжущих материалов располагается на мостовом кране и конструктивно похожа на проект «ContourCraft». Но в отличие от «СС», в этом проекте используется высокопроизводительный бетон [7], что обеспечивает лучшие свойства изготавливаемого материала. Высокие механические характеристики материала, в комплексе с небольшим диаметром экструдера (от 4 до 6 мм), обеспечивают более точную печать. Но увеличение точности изготовления увеличивает и длительность процесса производства. Изначально проект был направлен на развитие технологий 3D-печати в целом, но предлагаемые решения сократили эффективность и увеличили стоимость используемых материалов. А использованием в проекте мостового крана ограничивает возможность создания различных геометрических форм.

В 2010 году итальянским изобретателем Энрико Дини был разработан проект 3D-принтера «D-Shape» [2], позволяющий печатать здания неправильной формы. Установка представляет собой печатающую головку, установленную на мостовой кран. Связующее вещество вводится в масштабную песчаную «кровать», где оно затвердевает. Вещество вводят последовательно слой за слоем, после чего напечатанную деталь вынимают из «кровати», а оставшийся песок используется повторно. Первоначально проект предназначался для производства панелей вне площадки, а также для конструктивных элементов сложной геометрической формы. Конструкции D-образной формы возводятся в 4 раза быстрее, а затраты уменьшаются в 2 раза по сравнению с традиционными конструкциями [4]. В настоящее время Дини, в сотрудничестве с голландским архитектором Ruijsenaars, участвует в проекте печати здания в форме листа Мёбиуса.

В 2012 году Новиков, совместно с коллегами-архитекторами из Института усовершенствования архитектуры Каталонии в Испании, изобрели робота, названного «Stonespray» [4]. Он может использовать органические материалы в качестве базового материала. Архитектурные формы возводятся путем нанесения смеси почвы и экологически чистых вяжущих компонентов с помощью системы струйного распыления.

Однако, с помощью аддитивной технологии реально возведена всего лишь одна серия из 10 домов. Она была напечатана в 2014 году в Китае с использованием запатентованного материала на цементной основе, строительного мусора и стекловолокна. При помощи печати возводились пол и стены, кровля же была выполнена традиционными методами. Печать таких домов эконом класса отличается очень быстрыми сроками возведения. Помимо того, использование строительных отходов делает такое производство экологически чистым. Также компания возвела несколько индивидуальных домов, где в качестве арматуры была использована стеклопластиковая сетка.

Конструкция принтера может быть представлена в любом исполнении: в виде мостового, козлового крана или стрелы-манипулятора. Ключевым звеном в этой технологии является использованный для печати материал. Существует 2 ограничения, преодолев которые аддитивные технологии смогут обеспечить надежность и эффективность в промышленном производстве [1]. Во-первых, слабым местом является связь между двумя последовательно напечатанными слоями. При этом сила сцепления со временем уменьшается. Во-вторых, должен производиться мониторинг твердения экструдированных слоев с течением времени. Таким образом, материал должен обладать достаточной прочностью, позволяющей выдерживать вес верхних слоев. Это ограничение может привести к увеличению длительности процесса печати объекта. Возникает противоречие: с одной стороны, временной интервал между двумя осажденными слоями должен быть достаточно длинным, чтобы обеспечить достаточную механическую прочность, способную выдержать вес осажденных слоев, а с другой - достаточно коротким, чтобы обеспечивать оптимальную прочность сцепления, и скорость строительства [3].

Способность осажденных слоев поддерживать свой собственный вес связана с его реологией, а точнее, пределом текучести [3]. В послойном возведении конструкции первый выдавленный слой подвергается максимальной нагрузке. Для обеспечения её надежности и стабильности во время печати, предел текучести должен быть достаточным, чтобы выдержать прилагаемую нагрузку. Тогда возникает новый парадокс: смесь должна быть достаточно жидкой для экструзии, но при этом и достаточно твердой для обеспечения механической стабильности. Предел текучести материалов в состоянии покоя на основе цемента возрастает с течением времени; это обратимое поведение связано с зарождением цементных зерен в точке их контакта путем формирования связей CSH до времени схватывания [3].

Был поставлен эксперимент [3], цель которого заключалась в предсказании стабильности слоя в процессе печати и оптимизации скорости строительного производства. Используемый материал состоял из 50% из цемента, 25% из известняка и на 25% из каолина; водоцементное отношение 0,41. Также в смесь был добавлен поликарбоксилат (полимерный порошок), в отношении порошка к цементу, равному 0,3%. Цилиндрический образец высотой 35 мм и диаметром 60 мм постепенно нагружался так, как если бы на него последовательно сжимались верхние слои. Полученные экспериментальные данные о пределе текучести материала согласуются с кривыми Перро и моделью Руссель.

Результаты показали, что все возникающие напряжения зависят от времени: вертикальное напряжение зависит от скорости строительства, а критическое напряжение зависит от структурного наращивания бетона в состоянии покоя. Стабильность разработанной структуры обеспечивается тогда, когда вертикальное напряжение не превышает критического напряжения.

В другом исследовании [4] было рассмотрено влияние направления печати на прочность изготавливаемых образцов. Материал представлял собой смесь гипсового порошка zp150 и связующего ZB60, с массовой долей 21,8% для связующего вещества. На сжатие испытывали напечатанные на 3D-принтере кубики размерами 70x50x50 мм. На изгиб исследовали образцы размерами 40 мм x 40 мм x 160 мм для изучения свойств в пределах полосы. Во время исследований было так же отмечено, что при долгой печати (один образец создавался до 10 часов) качество ухудшается, что отразилось на полученных данных. Несмотря на то, что данные испытаний показывают, что напечатанные образцы не подходят для конструктивных элементов из-за их хрупкости и низкой прочности, был сделан ряд выводов. Результаты показали ярко выраженное ортотропное поведение образцов, зависящее от расположения слоёв. Таким образом, направление печати оказывает значительное влияние на несущую способность конструкции.

Также были проведены эксперименты [5], показывающие значение геометрических характеристик объекта на его физико-механические свойства. Исследователи отметили, что использование 6-осевого манипулятора, вместо широко распространённого мостового крана, позволяет обеспечивать геометрическую сложность и точность печати. А использование специального метода непрерывной нарезки позволяет создавать слои с различной толщиной для обеспечения механической надежности конструкций.

Действительно, если 3D-печать войдет в массовое производство, то понадобится переосмысление архитектурных форм. Реальными для печати стали бы сводчатые конструкции. Обсуждажен и способ подачи бетона к принтеру. Возможно, подача густого бетона под высоким давлением позволила бы технологии приблизиться к реальной жизни.

В России ведется несколько разработок этой технологии. В Пензенском Государственном университете Архитектуры и Строительства командой "Инновационных технологий" разработан специальный бетон, который вполне подходит для использования в 3D-принтерах. «Мобильные системы управления» из Набережных Челнов совместно с группой ученых из Камской государственной инженерно-экономической академии придумали установку для создания мобильных домов. Её суть состоит в том, что печать совершается вокруг аппарата, после чего он выезжает из построенного здания. Но строительство домов в нашей стране достаточно отдаленная перспектива. Это обуславливается различными факторами. Необходимо развитие конструктивных решений домов, построенных с помощью аддитивных технологий. А суровые климатические условия в большинстве регионов страны потребуют создания сложных смесей, содержащих морозостойкие добавки. Создание новых материалов всегда требует долговременных и дорогостоящих испытаний, долгого пути изысканий и сертификаций.

Список использованных источников:

1. Lloret E., Shahab A.R., Linus M., Flatt R.J., Gramazio F., Kohler M., Langenberg S. (2015). Complex concrete structures: merging existing casting techniques with digital fabrication. *Comput-Aided Des* 60:40–49.
2. Cesaretti G., Dini E., De Kestelier X., Colla V., Pambaguian L. (2014). Building components for an outpost on the soil by means of a novel 3D printing technology. *Acta Astronaut* 93:430–450.
3. Perrot A., Rangeard D., Pierre A. (2015). Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing construction techniques. *Materials and Structures*, April 2016, 1213–1220.
4. P. Feng, X. Meng, J. F. Chen, L. Ye. (2015) Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious binders. *Construction and Building Materials* 93: 486–497.
5. Gosselina C., Duballet R., Rouxa Ph., Gaudillière N., Dirrenberger J. (2016) Large-scale 3D printing of ultra-performance concrete – a new processing route for architects and builders. *Materials & Design* 100: 102–109.