

ПРИМЕНЕНИЕ ГРУНТОБЕТОНА В 3D ПЕЧАТИ

Губанов А.В.^{1,a}, Кутугин В.А.^{2,b}, Новикова Е.А.

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 36, 634050*

² *Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050*

E-mail: ^a derzhiarbuz@gmail.com, ^b kutugin@gmail.com

Введение

3D печать зданий и малых архитектурных форм является одним из развивающихся направлений в аддитивных технологиях. Ключевыми отличиями строительной 3D печати от прочих видов печати являются большая величина печатаемого объекта, его прочность и длительность эксплуатации в изменяющихся климатических условиях, а также менее высокие требования к точности печати.

Основной подход, используемый в строительной 3D печати сегодня, заключается в послойном нанесении заранее приготовленной бетонной смеси по заданной траектории. Широкую известность подобный подход получил под названием Contour Crafting. В данной технологии, как правило, используются достаточно жидкие бетонные смеси с большим сроком схватывания. Они промышленно выпускаются в виде сухих смесей и доступны, однако ими сложно печатать объекты с гранями, сильно отклоняющимися от вертикали. Печать арочных и сводчатых конструкций такими материалами затруднена.

Объекты произвольной формы из бетона позволяет получать технология D-shape, вариант binder-jetting технологии для крупногабаритных изделий. Объект выращивается послойно в объёме, полностью заполненном сухим порошком, затем лишний порошок удаляется. Минусом данной технологии является то, что изделие должно целиком размещаться внутри ёмкости, заполненной сухой смесью, причём основная масса смеси не используется.

Другим радикально отличающимся способом строительной печати является печать полимер-бетонами, в которых неорганический наполнитель находится в матрице из термопластичного или фото- полимера. Данный подход позволяет печатать геометрию любой сложности, доступной 3D печати пластиками (в том числе сводов и перекрытий), однако использование пластика в качестве строительного материала имеет известные минусы (высокая стоимость пластика в сравнении с неорганическими материалами, меньшая огнестойкость, меньший срок службы). Помимо этого существуют технологии печати серобетонами, вспенивающимися композициями, торкрет-бетонами и пр..

Данная работа посвящена применению в 3D печати такого материала, как грунтобетон. Рассматриваются некоторые особенности работы с этим материалом, его отличительные свойства и их влияние на процесс 3D печати, а также полученные результаты.

Главной целью данной работы являлось выяснение принципиальной возможности 3D печати объектов с сильно отклоняющейся от вертикали геометрией (своды, арки) используя материал, изготовленный из доступного минерального сырья (грунтобетон).

Для решения поставленной цели требовалось решить следующие задачи. (1) Исследовать свойств смеси для 3D печати (определить минимальное напряжение сдвига свежесжатой смеси; определить способности смеси к пластической деформации без разрывов; определить прочностных характеристик затвердевших композитов (сопротивление сжатию, разрыву) в зависимости от влажности. (2) Осуществить 3D печать (разработать ЧПУ роутера достаточного размера и несущей способности; разработать прототип печатающей головки для печати модельной смесью и печать тестовых образцов; разработать прототипа печатающей головки для печати целевой смесью и печать тестовых образцов).

Грунтобетон и его свойства

Грунтобетон - строительный материал, получаемый из связных грунтов (глин, суглинков, супесей), минеральных вяжущих, воды и различных добавок. Как правило, грунтобетон получают полусухим способом и используют для формирования строительных блоков, фундаментов зданий [2], стен зданий целиком.

Использование грунта в качестве строительного материала имеет долгую историю [1]. В регионах с сухим климатом возводят постройки из армированных органическими волокнами несвязанных грунтов (саман, глинобит). Итальянская компания WASP предложила использовать 3D печать саманом как способ решить проблему доступного жилья в засушливых регионах и создала принтер Big Delta [7].

В регионах с влажным климатом модификация грунта минеральными вяжущими позволяет возводить глинобитные постройки, устойчивые к воздействию влаги.

Несмотря на доступность сырья для изготовления грунтобетона, он не получил широкого распространения. Грунтобетон пластичен и формируется давлением, его нельзя заливать в формы или эффективно уплотнять вибрацией, а прочность грунтобетона [2] уступает прочности бетонов на основе песчано-цементных смесей и не позволяет возводить здания высокой этажности. В итоге использовать грунтобетон в массовом строительстве экономически не целесообразно. Однако свойство пластичности становится крайне полезным, когда речь заходит о применении материала в 3D печати.

Основным компонентом грунтобетона является глина или суглинок, поэтому его реологические свойства близки к реологическим свойствам глин и суглинков. Введение цемента, который является электролитом, несколько ухудшает пластичность, но в целом поведение свежей грунтобетонной смеси аналогично поведению глины или суглинка, на основе которого она сделана.

В определённом диапазоне влажности реология глин и суглинков хорошо описывается моделью бингамовской жидкости [8]. Бингамовская жидкость ведёт себя как твёрдое тело до тех пор, пока напряжение сдвига между слоями не достигнет некоторой величины $\tau_{\min}$, называемый минимальным напряжением сдвига. При превышении этого напряжения бингамовская жидкость течёт как ньютоновская жидкость. Таким образом, бингамовская жидкость является пластичной - она меняет форму при приложении усилий и сохраняет её после их снятия.

Технология 3D печати, использующая свойство пластичности чернил для формирования пространственных объектов, называется DIW (direct ink writing), и её применение для печати изделий из керамики широко распространено. Данная технология позволяет печатать довольно сложную геометрию с большими углами отклонения от вертикали (45 градусов и выше).

Экспериментально полученное значение $\tau_{\min}$, подходящее для 3D печати крупногабаритных изделий, лежит в диапазоне от 0,2 до 0,25 МПа. Значение было получено с использованием модифицированного вискозиметра Лотова [9] для грунтобетона на основе глины Корниловского месторождения Томской области.

Данное значение позволяет конструировать экструдер, который должен создавать на выходе давление, не меньшее, чем $\tau_{\min}$.

В отличие от грунта, грунтобетон, будучи затворённым водой, довольно быстро меняет свои пластические свойства. Грунтобетон на основе глины, содержащий 20% цемента становится не пригоден для печати через 20 минут после затворения водой, а грунтобетон, содержащий 50% цемента теряет пластичность через 5 минут.

Для того, чтобы грунтобетон получился прочным, необходимо обеспечить влажные условия твердения в течении довольно длительного срока. По информации авторов [2], грунтобетон первые 2 недели должен находиться во влажной среде. При нормальных условиях твердения через неделю он наберет 2/3 своей расчетной прочности. Вероятнее

всего, длительные сроки твердения обусловлены тем, что основной компонент грунтобетона, грунт, испытывает усадку при потере влаги.

Марка по прочности на сжатие для грунтобетона, используемого для 3D печати, лежит в пределах M50 - M100, что достаточно для возведения малоэтажных строений при условии, что грунтобетон будет испытывать только сжимающие нагрузки. Прочность грунтобетона на растяжение крайне мала по сравнению с железобетоном.

Учитывая эти свойства, а также то, что грунтобетон позволяет печатать относительно сложную геометрию, предполагается использовать этот материал не для печати несущих конструкций, а для печати несъёмной опалубки, в которую затем мог бы заливаться микроармированный бетон на основе песчано-цементной смеси. Печать тонкостенных конструкций, прочности и жёсткости которых хватает на то, чтобы выдержать самих себя и заполнитель, позволит использовать сильные стороны грунтобетона и свести на нет его недостатки, а также уменьшить время 3D печати и строительства объекта в целом.

Из-за того, что грунтобетон быстро теряет пластические свойства после затворения водой, использовать распространённые в технологии DIW технические решения доставки материала к точке печати не представляется возможным. Необходимо иметь печатающую головку специального устройства, в которую сухая смесь и жидкость затворения транспортируются по отдельности и смешиваются в непрерывном режиме непосредственно перед экструзией.

Особенность 3D печати по технологии DIW заключается в том, что количество материала, находящегося в состоянии, пригодном для экструзии, в единицу времени очень невелико. Это отличительная черта любого способа 3D печати, основанного на нанесении материала вдоль заданной траектории, в сравнении с традиционными способами производства. Благодаря этому, механизмы, осуществляющие некоторый технологический процесс с материалом для печати, могут быть существенно меньше и конструктивно проще, чем механизмы для осуществления тех же процессов в промышленных объёмах.

Когда затворение сухой смеси жидкостью происходит непрерывно в малом объёме, существенным фактором, влияющим на скорость затворения, становится капиллярный подсос. Так, сухой, свободно насыпанный порошок грунтобетона, вступающий в контакт с жидкостью, пропитывается ей на глубину 15 мм, причём на глубину 10 мм жидкость проникает за несколько секунд. Если поперечное сечение канала, в котором происходит перемешивание, в своём наибольшем измерении не превышает 10 мм, необходимость в интенсивном механическом перемещении частиц смеси друг относительно друга фактически отпадает. Экспериментально было установлено, что для того, чтобы получить из сухой смеси и жидкости затворения однородный жгут диаметром 10 мм, экструдированный под давлением 0,25 МПа, длина области смешивания и экструзии может быть не больше 250 мм. При этом время от момента затворения смеси жидкостью до момента экструзии в разработанном устройстве не превышает 30 с.

Результаты

Чтобы убедиться в том, что указанные свойства грунтобетона позволяют осуществлять печать объектов с гранями, сильно отклоняющимися от вертикали, были разработаны ЧПУ роутер с рабочей областью 1500x1500x1300 мм., печатающая головка, осуществляющая замешивание и экструзию грунтобетона в непрерывном режиме и ПО управления.

Итогом проделанной работы стала печать грунтобетонного купола высотой 350 мм., с максимальным углом отклонения стенки от вертикали 45 градусов и толщиной стенки 20 мм (Рис.1). Состав грунтобетона: 50% глины, 50% цемента без каких-либо дополнительных добавок (кроме воды). Таким образом, продемонстрирована принципиальная возможность использования простого по составу, доступного неорганического материала, для печати сводчатых тонкостенных конструкций по технологии DIW.



Рисунок 1. Грунтобетонный купол



Рисунок 2. Напечатанная стенка в разрезе



Рисунок 3. Попытка печати с отклонением 60 градусов от вертикали

Список литературы

1. Минке Г. Глинобетон и его применение / Г. Минке. – Калининград: Янтарный сказ, 2004. – 232 с.
2. Рамазанов А.А., Бадаева А.Д., Ланин Е.Б., Алнашаш Т.А. Грунтобетон в закладке фундамента / Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – № 3(30). – С. 111-128.
3. Комохов А.П. Высокоэффективная технология грунтобетона как современного композиционного материала / Строительство и реконструкция. – 2002. – № 2. – С. 25-28.
4. Zakrevskaya L.V., Lubin P.A., Avdeev S.N., Gandelsman I.A., Filippov S.V. Dome houses made of soil - concrete based on local raw materials / Инженерно-строительный журнал. – 2017. № 7. – С. 123-128.
5. Bos F.P., Wolfs R.J.M., Ahmed Z.Y., Salet T.A.M. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing / Virtual and Physical Prototyping. – 2016. – Vol. 11, Iss. 3, P. 209-225.
6. THE SHARING KNOWLEDGE The DELTA WASP 4-metres-high printer for an important architectural project. [Электронный ресурс] : [офиц. сайт.] / WASP s/o CSP S.r.l.. – Режим доступа: <http://www.wasproject.it/w/en/the-delta-wasp-4-metres-high-printer-for-an-important-architectural-project/> – Заглавие с экрана (дата обращения 1.05.2019).
7. Extrusion in Ceramics / Edited by Handle F. – Switzerland: Springer Nature, 2007. – 413 p.
8. Устройство для измерения вязкости : пат. 667866 Рос. Федерация / Лотов В.А.; опубл. 15.06.79.

CONCRETE IN 3D PRINTING

A.V. Gubanov^{1,a}, V.A. Kutugin^{2,b}, E.A. Novikova

¹ *National Research Tomsk State University, Lenin avenue, 36, 634050, Tomsk, Russia*

² *National Research Tomsk Polytechnic University, Lenina avenue, 30, 634050, Tomsk, Russia*

E-mail: ^a derzhiarbuz@gmail.com, ^b kutugin@gmail.com

Construction 3D printing (3DCP) is one of the developing branches of additive technology. Main differences from other 3D printing technologies are a large size of printed object, it's solidity, durability in different climate conditions, relatively low accuracy requirements.

Cement based soil concrete is known, but rarely used construction material for buildings. It has serious disadvantages that make it impracticable for classical building technologies, but also it has some useful properties that make it suitable for 3D printing process. The objective of the research is to show a possibility to print arches and domes with at least 45 degrees overhang (which is hardly achievable for Contour Crafting) using cement based soil concrete as material. To reach this goal several concrete composition was tested, then suitable 3D printer and printhead was made and printing process implemented.

The main useful property of a soil concrete is it's plasticity (rheological model of Bingham fluid can be used) during first several minutes it was mixed with a water. Fortunately the plasticity allows to implement DIW (direct ink writing) printing method and reach whole specter of a geometry could be printed with clay. Unfortunately it is impossible to use common DIW extruder types because of short lifetime of a fresh mixed printing media, so the special hardware have to be designed.

To implement a soil concrete 3D printing process there should be an extruder, that is a mixer also, so we could mix a dry component powder with a water (or another fluid) continuously, following right proportions, and extrude it as soon as possible before rheological properties of mixture gone unsatisfactory. The possibility to make relatively small and lightweight suitable hardware caused by the fact, that a mixing of fluid and powder in small volume is significantly affected by capillary suction, so there is no lengthy and intensive mechanical mixing needed.

The article contains several qualitative statements about using a soil concrete as a material for 3DCP and it's experimental approvement, also it contains some quantitative characteristics of print media that is suitable for 3D printing.

The result of research is a 3D printed dome with 45 degrees overhang, that means it's possible to use a cement based soil concrete to print such kind of geometry.