

3D печать и армирование бетонной смеси

*Е.С. Турьшева¹, А.А., Марченко¹, Г.К. Горовая²,
Н.А. Челночков¹, Д.С. Шулюшенков¹*

*1. Сибирский федеральный университет, Красноярск
2. АНО «Красноярскстройсертификация», Красноярск*

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы 3D-печати бетонной смеси с автоматизированной системой интеграции армирования, проанализировано влияние смеси на динамику строительного принтера. Подача арматуры была организована таким образом, чтобы обеспечить нанесение практически без напряжения. Для этой цели был разработан роликовый питатель для задней части сопла. В ходе работы строительного 3D-принтера были получены данные с акселерометра в виде графиков частоты колебаний работы строительного принтера, которые характеризуют основные рабочие параметры. Представлены экспериментальные кривые зависимости усилия от смещения для образцов размером 40 × 40 мм с усилением арматурой.

Ключевые слова: строительный 3D-принтер, бетонная смесь, характер колебаний, акселерометр, интеграция арматуры.

Введение

Новым мировым трендом в строительстве являются аддитивные технологии. 3D-печать и ее изучение сейчас весьма актуальны, так как эта технология позволяет решить многие современные проблемы различных отраслей деятельности человека: промышленные, жилищные, экологические и пр. Обзор международного опыта реализации технологии 3D-печати в строительстве содержится в работе [1]. Технологии 3D-печати строительства в Китае рассчитаны на эксплуатацию зданий и сооружений в пределах одного климатического пояса. В Голландии материалом для 3D-печати строительства служит биопластик, полученный в результате долгой переработки зерновой культуры. В Дубае принтер использовал смесь цемента, армированного пластика и армированного стекловолокном гипса. В России также развиваются аддитивных технологий в строительстве [2]. В Ярославле компанией СПЕЦАВИА в 2015 году был построен одноэтажный коттедж с мансардой. Коттедж строился в павильоне большим по размеру самого коттеджа во избежание попадания осадков на каркас будущего

здания. Материалами служили: модифицированный водостойкий гипс с добавлением диатомитных шариков, гипс со стеклянной и полиэфирной фиброй, каолиновые смеси. Такие как, невозможность печатать крыши, закладки труб и электрики. На данный момент нет автоматизированного процесса закладки армирующих поясов на этапе печати здания. Исследователи, занимавшиеся вопросом армирования 3D-бетона, в своей работе использовали шестимиллиметровую стальную фибру, добавление которой позволило значительно увеличить как прочность при изгибе, так и показатели энергии разрушения [3].

Познавательный обзор применения 3D-печати в строительной индустрии содержится в работе [4]. Авторы данной статьи анализируют работу, проводимую в этой области во всем мире. В качестве армирующей добавки была использована базальтовая фибра. Авторы в статье [5] также указывают на перспективность использования аддитивной 3D-печати для создания объектов сложной формы. При этом анализируется метод селективного локального упрочнения путем формирования топологии, конфигурация которой соответствует полю напряжений, возникающему в процессе эксплуатации.

В статье [6] содержится обзор усиления и восстановления бетонных армированных конструкций с применением стекловолокна. Рассмотрено применение алюмоборосиликатного стекловолокна при использовании специальных добавок для снижения содержания щелочи в среде твердеющего бетона. Авторы исследования [7] разработали изобретение, относящееся к строительству в области повышения эффективности возведения стен здания из армированного бетона. Бетон послойно экструдируют через сопло строительного 3D-принтера с образованием внешнего и внутреннего слоев стены, стену армируют и заполняют полость между внешней и внутренней слоями стены теплоизолирующим материалом.

Комплексное решение этих вопросов позволит данной технологии составить серьезную конкуренцию традиционным способам строительства. Основываясь на обзоре проектов строительных предприятий, занимающихся созданием жилых помещений с помощью аддитивных технологий, можно сделать вывод, что существуют три разных способа создания объемных конструкций: послойное экструдирование; селективное спекание; стелеография. Использование аддитивных технологий в строительстве находится в начале своего развития, и, несмотря на перспективность и экономичность процесса, процесс протекает очень медленно. Здесь есть нерешенные вопросы [8-9].

Целью работы является совершенствование процесса печати строительных изделий на 3D-принтере.

Методы

Экспериментальная модель строительного 3D-принтера приведена на рис. 1. Модель принтера выполнена со скользящей опалубкой, которая предназначена для формирования бетонного бруса и исключает растекаемость материала в процессе изготовления изделия.

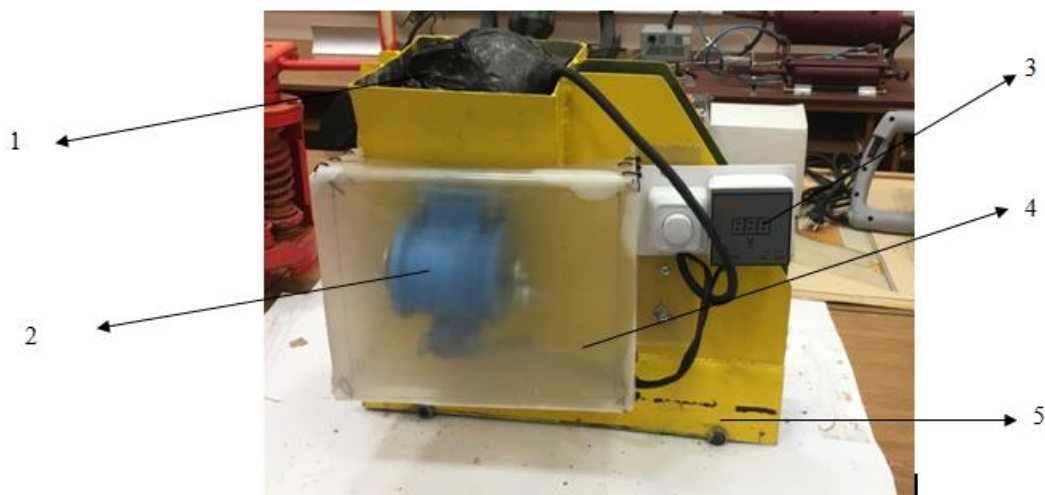


Рис. 1. Экспериментальная модель строительного 3D-принтера:

1 - бункер; 2 - вибратор; 3 - пульт управления; 4 - кожух вибратора; 5 - скользящая опалубка 3D-принтера

Процесс виброформования бетонного бруса осуществляется путем загрузки бетонной смеси в бункер 1 3D-принтера с последующим вибрированием вибратором 2. В результате смесь разжижается и поступает из бункера в скользящую опалубку 5. Испытания проводились при подаче на вибровозбудитель напряжения 40В, 120В, 200В. Для усиления формируемых изделий выполнялось армирование 3D - бетона путем интеграции гибкой арматуры в укладываемый слой бетонной смеси. Это обеспечивает лучшее сцепление между арматурой и бетоном, нежели, когда арматура укладывается между слоями бетона [10-11].

Результаты

Процесс виброформования описывается дифференциальными уравнениями по оси X и Y:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 + b \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + C \cdot (x_1 - x_2) = F \cdot \sin(\omega t + \alpha) + m_1 \cdot g \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2 + b \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + C \cdot (x_1 - x_2) = F \cdot \sin(\omega t) + m_2 \cdot g \end{cases}$$

где m_1 – масса вибровозбудителя, кг; m_2 – масса конструкций, кг; x_1 – перемещение, мм; x_2 – перемещение, мм; g – ускорение свободного падения, м/с²; F – вынуждающая сила вибровозбудителя, кН; C – жесткость системы, кН/м. ω — угловая скорость вращения дебаланса;

В качестве исходных данных приняты параметры, приведённые в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные моделирования

C, кН/м	0,5	0,5	0,5	10	10	10	100	100	100
t, с	10	100	200	10	100	200	10	100	200

Используя полученную систему, составлена блочная модель в среде Matlab*Simulink, рис. 2.

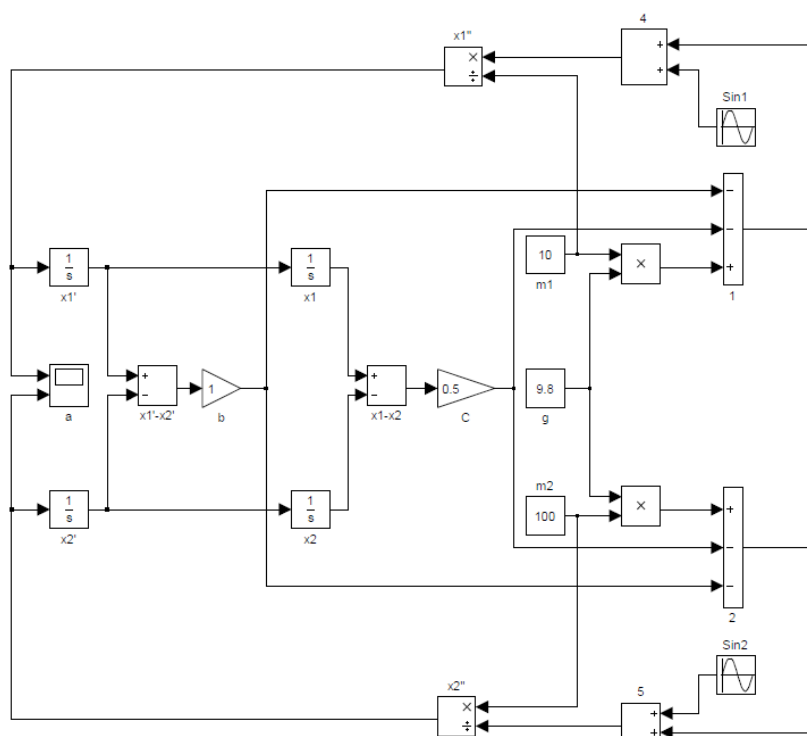


Рис. 2. Блочная модель виброформования, составленная в среде Matlab*Simulink

На рис. 3 приведен график ускорений колебательной системы при $C = 0,5$ кН/м и $t = 10$ с, полученный путем реализации блочной модели виброформования в среде Matlab*Simulink.

Результаты моделирования показали, что колебания системы синусоидальны, правильной формы и происходят в противофазе. При $C=10$ кН/м и $t=200$ с ускорения не выходит за пределы граничной зоны $[0; 0,2]$ м/с².

Для проверки правильности результатов, полученных методом моделирования, были проведены экспериментальные исследования. Результаты экспериментальных исследований показали, что наиболее выраженная динамика наблюдается по оси X и при моделировании процессов. По осям Y и Z они незначительные и не оказывают уплотнения смеси.

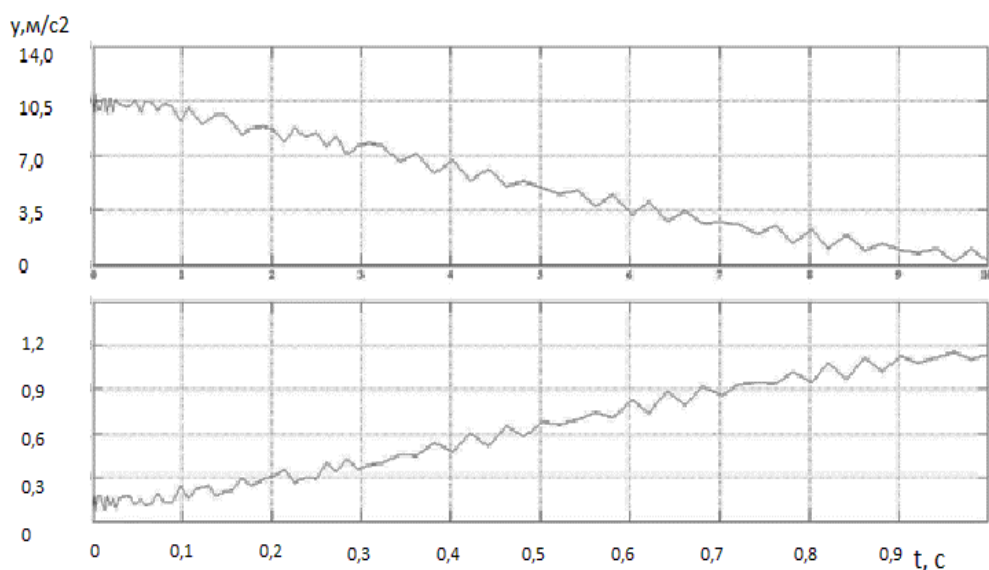


Рис. 3. График ускорений колебаний системы при $C = 0,5$ кН/м и $t = 10$ с

Динамика процесса уплотнения по основной оси X представлена в виде графиков на рис. 4 при подаче напряжения на вибратор 40В.

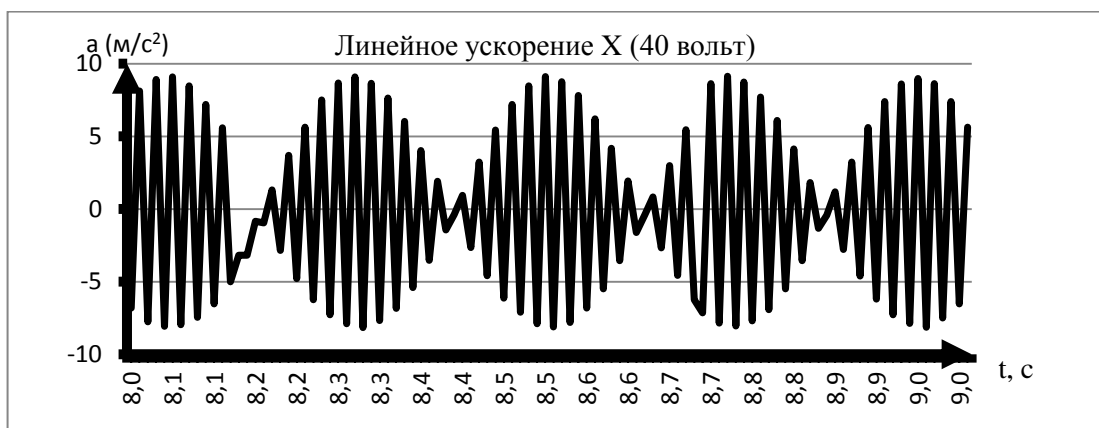


Рис. 4. Колебания стенок бункера при подаче на двигатель напряжения 40В

Максимальная амплитуда колебаний достигала на всех графиках значения $9,8 m/s^2$. Наименьшее время переходного процесса составляет от 0,2 до 0,4 секунд. Результаты экспериментальных исследований имеют хорошую корреляцию с результатами имитационного моделирования.

Полученный образец изделия после затвердевания был испытан на прочность. Для этого были подготовлены опытные образцы, уплотненные при различной частоте. Образцы подверглись испытанию на прочность на прессе. На рис. 5 представлены экспериментальные кривые зависимости усилия от смещения для образцов размером 40×40 мм с усилением углеродистой нитью и без нее.

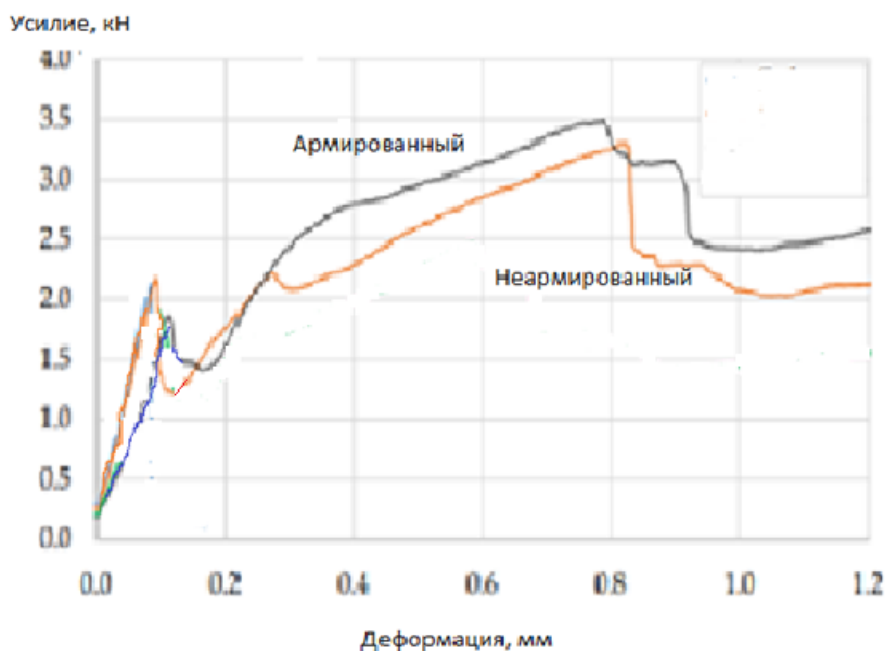


Рис. 5. График силы смещения для образца с поперечным сечением 40мм × 40 мм.

В образцах в начале нагружения наблюдается линейная зависимость силы от деформации почти 2,04 кН. Образец без армирования разрушился при усилии 2,06 кН. В неармированных образцах появилась трещина при силе 1,1 кН. Для усиленных образцов образовалось несколько узких трещин при усилии 1,9 кН. Армированный образец разрушился при усилии 3,4 кН. Прочность увеличилась на 18% по сравнению с обычным бетоном. Среднее максимальное усилие армированных образцов составило 0,56 кН, что соответствует прочности при изгибе 8,42 Мпа.

Выводы

1. На качество формования строительного бруса влияет круговая частота колебаний вибровозбудителя, в зависимости от величины напряжения, подаваемого на электродвигатель. С уменьшением частоты вибрационного воздействия вибровозбудителя формируемое изделие не теряет заданных геометрических параметров.

2. В ходе последующего исследования процесса формирования бетонной смеси необходимо рассмотреть влияние реологических свойств печатаемого бетона на процесс интеграции армирования и сцепление между арматурой и бетоном.
3. Нужно учитывать реологические свойства цементного раствора, и физико-химический механизм воздухововлечения во время экструзии и после снятия технологической нагрузки.

Литература

1 Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С., Зыкова В.В., Карпеня А.Н., Ким А.А., Финашенков Е.А. 3D-печать в строительстве // Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. №1(52). С. 27-46. URL: [unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2017/1\(52\)/3_zykova_52.pdf](http://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2017/1(52)/3_zykova_52.pdf)

2 Лунева Д.А., Кожевникова Е.О., Калошина С.В. Применение 3D-печати в строительстве и перспективы ее развития // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2017. Т.8, №1. С. 90–101.

3 Вага Д.И., Десятов Л.В., Цорик А.В., Швец А.В. Современная технология «Контурного строительства» // Современные тенденции и проблемы развития. УрГАХУ, Екатеринбург. 2019. URL: <https://pnu.edu.ru/nionc/pub/articles/2175/>

4 Иноземцев А.С., Королев Е.В., Куй З.Т. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2018. Т.13. №7(118). С. 863–876.

5 Абрамян С. Г., Илиев А.Б. Современные строительные аддитивные технологии // Инженерный вестник Дона, 2018, №1. URL:



<https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-stroitelnye-additivnye-tehnologii-chast-1>

6 Серков А.И. Развитие технологии трехмерной печати в области строительства // Региональное развитие: электронный научно-практический журнал. 2017. №2 (20). URL: cyberleninka.ru/article/n/razvitie-tehnologii-trehmernoy-pechati-v-oblasti-stroitelstva

7 Емельянов Р.Т., Прокопьев А.П., Баранова Г.П., Фролов И.А., Пиндур С.В. Автоматизированная нейро-нечеткая система управления приводом шнекового дозатора печатающей головки строительного 3D-принтера // Инженерный вестник Дона, 2023, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023

8 Злобина И. В., Бекренев Н. В., Павлов С. П. Исследование прочности модифицированных в СВЧ электромагнитном поле объектов 3D-печати, армированных композитом с углеродным волокном // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2017. Т.17. №.4. С. 70-81.

9 Кузик Е.С. Применение стекловолокна для создания конструкционных композитов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 7-6. С. 939-942

10 Endzhievskaya I. G., Yakshina A. A., Emelyanov R. T., Berseneva M. L. Prospects for Construction of Monolithic Cement-Concrete Transport Infrastructure Facilities in the Siberian Region // Materials of the International Conference Industrial and Civil Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 322-328.

11 Шулюшенков Д.С., Турышева Е.С. Экспериментальный стенд бетоноукладчика для производства арболита и изделий из него // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее. 2022. С. 375-378.

References

1 Vatin N.I., Chumadova L.I., Goncharov I.S., Zykova V.V., Karpenya A.N., Kim A.A., Finashenkov E.A. Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskij universitet Petra Velikogo, Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy. 2017. №1(52). pp. 27-46. URL: [\unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2017/1\(52\)/3_zykova_52.pdf](http://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2017/1(52)/3_zykova_52.pdf)

2 Luneva D.A., Kozhevnikova E.O., Kaloshina S.V. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura. 2017. t.8, №1. pp. 90–101

3 Vaga D.I., Desyatov L.V., Tsorik A.V., Shvets A.V. Sovremennyye tendentsii i problemy razvitiya. UrGAKHU, Yekaterinburg. 2019. URL: <https://pnu.edu.ru/nionc/pub/articles/2175/>

4 Inozemtsev A.S., Korolev E.V., Kuy Z.T. Vestnik MGSU. 2018. T.13. №7(118). pp. 863–876.

5 Abramyan S. G., Iliyev A.B. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-stroitelnye-additivnye-tehnologii-chast-1>

6 Serkov A.I. Regional'noye razvitiye: elektronnyy nauchno-prakticheskij zhurnal. 2017. №2 (20). URL: [\cyberleninka.ru/article/n/razvitie-tehnologii-trehmernoy-pechati-v-oblasti-stroitelstva](http://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-tehnologii-trehmernoy-pechati-v-oblasti-stroitelstva)

7 Yemel'yanov R.T., Prokop'yev A.P., Baranova G.P., Frolov I.A., Pindur S.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023

8 Zlobina I. V., Bekrenev N. V., Pavlov S. P. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroyeniye. 2017. T.17. №4. pp. 70-81.

9 Kuzik E.S. Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. 2016. № 7-6. pp. 939-942.



10 Endzhiyevskaya I. G., Yakshina A. A., Yemel'yanov R. T., Berseneva M. L. Materials of the International Conference Industrial and Civil Engineering. Cham, 2021, pp. 322-328.

11 Shulyushenkov D.S., Turysheva E.S. Aktual'nyye voprosy stroitel'stva: vzglyad v budushcheye. 2022. pp. 375-378.

Дата поступления: 3.12.2023

Дата публикации: 13.01.2024