УДК 666.97
doi: 10.33622/0869-7019.2023.09.52-59

# Получение высокопрочного мелкозернистого бетона с помощью технологии 3D-печати

**Танг Ван ЛАМ**[1], кандидат технических наук, преподаватель-исследователь, lamvantang@gmail.com

**Нгуен Чонг ЧЫК**[2], кандидат технических наук, преподаватель-исследователь, trongchuc.nguyen@lqdtu.edu.vn

**Борис Игоревич БУЛГАКОВ**[3], кандидат технических наук, доцент, bulgakovbi@mgsu.ru

**Ольга Владимировна АЛЕКСАНДРОВА**[3], кандидат технических наук, доцент, aleksandrovaov@mgsu.ru

[1] Ханойский горно-геологический университет, 18 Фо Виен, Дык Тханг, Бак Ту Лием, Ханой, Вьетнам

[2] Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, 236 Хоанг Куок Вьет, Ханой, Вьетнам

[3] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

***Аннотация***. *Во многих странах мира была разработана и исследована технология 3D-печати бетона, обладающего высокими эксплуатационными характеристиками. Цель изготовления высокопрочного печатного бетона — применение усовершенствованной технологии строительства без использования опалубки и принудительного уплотнения бетонной смеси. Представлены результаты экспериментальных исследований состава и свойств мелкозернистых 3D-бетонов из доступных во Вьетнаме сырьевых материалов (цемент, зола-уноса теплоэлектростанции, микрокремнезем, мелкий заполнитель, суперпластификатор и вода). Результаты экспериментальных исследований показали, что существует потенциал для производства 3D-печатного бетона хорошего качества. Была разработана мелкозернистая бетонная смесь, обладающая необходимыми характеристиками для ее использования в технологии 3D-печати и позволяющая получить бетон высокой прочности. Приведенные экспериментальные исследования вполне достоверны, так как в работе были использованы современные приборы и методы исследований. Полученные результаты имеют реальные перспективы для практического применения во Вьетнаме.*

***Ключевые слова***: *метод 3D-печати, высокопрочный мелкозернистый бетон, прочность при сжатии, экструзионная способность, удобоукладываемость бетонной смеси*

***Для цитирования:*** *Лам Т. В., Чык Н. Ч., Булгаков Б. И., Александрова О. В.* Получение высокопрочного мелкозернистого бетона с помощью технологии 3D-печати // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 9. С. 52—59. doi: 10.33622/0869-7019.2023.09.52-59

## PRODUCING HIGH-STRENGTH FINE-GRAINED CONCRETE USING 3D PRINTING TECHNOLOGY

**Tang Van LAM**[1], lamvantang@gmail.com, **Nguyen Trong CHUC**[2], trongchuc.nguyen@lqdtu.edu.vn

**Boris I. BULGAKOV**[3], bulgakovbi@mgsu.ru, **Olga V. ALEKSANDROVA**[3], aleksandrovaov@mgsu.ru

[1] Hanoi University of Mining and Geology, 18 Pho Vien, Duc Thang, Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam

[2] Le Quy Don Technical University, 236 Hoang Quoc Viet Street, Hanoi, Vietnam

[3] Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

***Abstract***. *3D printing of concrete technology with high performance characteristics has been developed and researched in many countries of the world. The purpose of producing high-strength printed concrete is the use of advanced technology of construction without the use of formwork and forced compaction of the concrete mixture. The results of experimental studies of the composition and properties of fine-grained 3D concretes obtained using raw materials available in Vietnam (cement, fly ash from thermal power plants, silica, fine aggregate, superplasticizer and water) are presented. The results of experimental studies have shown that there is a potential for the production of 3D-printed concrete of good quality. A fine-grained concrete mixture has been developed that has the necessary characteristics for its use in 3D printing technology and makes it possible to obtain high-strength concrete. The experimental studies presented are quite reliable, since modern instruments and research methods were used in the work. The results obtained have real prospects for practical application in Vietnam.*

***Keywords***: *3D printing method, high-strength fine-grained concrete, compressive strength, extrusion ability, workability of concrete mixture*

***For citation:*** Lam T. V., Chuc N. T., Bulgakov B. I., Aleksandrova O. V. Producing High-Strength Fine-Grained Concrete Using 3D Printing Technology. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2023, no. 9, pp. 52—59. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2023.09.52-59

© ЛАМ Т. В., ЧЫК Н. Ч., БУЛГАКОВ Б. И., АЛЕКСАНДРОВА О. В., 2023

## Введение

Традиционные строительные технологии предусматривают большую долю ручного труда на стройплощадке, а также использование опалубки и принудительное уплотнение уложенной бетонной смеси. Все это существенно замедляет строительство [1, 2]. Дальнейшая индустриализация строительных технологий в направлении их большей механизации, автоматизации и особенно цифровизации способствовала появлению и применению в строительстве метода 3D-печати [3, 4], который обладает значительным потенциалом развития и в последние годы привлекает внимание ученых во многих странах мира [5—7].

Идея технологии строительной печати, основанная на превращении чертежей в законченные объекты в короткие сроки, без привлечения большого количества рабочих и со существенным снижением объемов образующегося строительного мусора, также вызывает интерес у инженеров, архитекторов, инвесторов и находит применение в практике современного строительства [1, 4, 7]. Однако хотя технология печати развивается быстрыми темпами, но до сих пор требования к материалам для 3D-печати удовлетворяются не лучшим образом.

Для успешного процесса печатный материал должен быть достаточно подвижным, чтобы его можно было бы непрерывно экструдировать через печатающую головку. При этом выдавливаемый через сопло состав должен иметь достаточную прочность при сдвиге для сопротивления деформации под действием собственного веса и веса печатных слоев над ним. Из результатов многих исследований [8, 9] следует, что составы при нахождении внутри печатного устройства должны быть подвижными и обладать определенной вязкостью, но после выхода из печатающей головки они в короткие сроки должны претерпевать переход в твердое состояние с достаточной прочностью, чтобы сопротивляться деформации.

*1. Минеральный состав и физико-механические характеристики портландцемента*

| Минеральный состав | % по массе | Нормальная густота, % | Сроки схватывания, мин | | Прочность при сжатии, МПа | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | начало | конец | 2 сут | 28 сут |
| $C_3S$ | 58,2 | 29,3 | 120 | 262 | 27,4 | 50,5 |
| $C_2S$ | 23,4 | | | | | |
| $C_3A$ | 3,2 | | | | | |
| $C_4AF$ | 12,4 | | | | | |
| др. | 2,8 | | | | | |

Бетон — один из важнейших строительных материалов и широко используется для строительства различных объектов во всем мире. Поэтому многие страны, включая Вьетнам, в свете происходящей в настоящее время промышленной революции 4.0 проводят исследования, направленные на изучение возможности получения высокоэффективных бетонов с использованием технологии 3D-печати [10—12]. Для реализации процесса 3D-печати как отдельных строительных конструкций, так и зданий и сооружений бетонная смесь должна обладать хорошими экструзионными свойствами и позволять получать в результате ее затвердевания конструкционный бетон с требуемой несущей способностью и красивым внешним видом. Поэтому исследования с целью разработки бетонных смесей, пригодных для использования в технологии 3D-печати, для Вьетнама важны и имеют большое практическое значение.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований свойств высокопрочного мелкозернистого бетона, полученного из доступных во Вьетнаме сырьевых материалов с использованием технологии 3D-печати.

## Материалы и методы исследования

В работе использовали следующие сырьевые компоненты.

Портландцемент (Ц) PC40 типа ЦЕМ I 42,5 Н производства завода «Бут Сон» (Вьетнам) с истинной плотностью 3,15 г/м$^3$, соответствующий требованиям ГОСТ 31108[1] и TCVN 2682[2]. Результаты анализа использованного портландцемента приведены в *табл. 1* и *2*.

Тонкодисперсные материалы включали в себя низкокальциевую (кислую) золу-уноса (ЗУ) ТЭС «Фа Лай» (Вьетнам) класса F и микрокремнезем конденсированный SF-90 (MK90) производства фирмы Vina Pacific (Вьетнам), отвечающие требованиям ГОСТ Р 56196[3], ГОСТ 25818[4] и TCVN 10302[5]. Химический состав и физические характеристики тонко-

1 ГОСТ 31108—2020 «Цементы общестроительные. Технические условия».

2 TCVN 2682:2009 «Portland cements — Specificationst» [Портландцементы — технические характеристики].

3 ГОСТ Р 56196—2014 «Добавки активные минеральные для цементов. Общие технические условия».

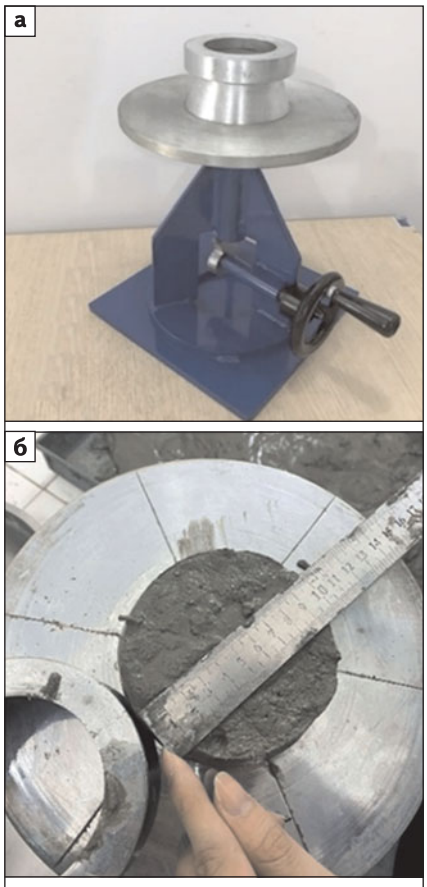
4 ГОСТ 25818—2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия».

5 TCVN 10302:2014 «Activity admixture — Fly ash for concrete, mortar and cement» [Активная добавка — летучая зола для бетона, строительных растворов и цемента].

*2. Химический состав и физические характеристики портландцемента, золы-уноса и микрокремнезема*

| Средний химический состав | Содержание сырьевых материалов, % по массе | | |
|---|---|---|---|
| | ЗУ ТЭС «Фа Лай» | МК90 | Портландцемент «Бут Сон» |
| $SiO_2$ | 54,62 | 91,65 | 20,4 |
| $Al_2O_3$ | 24,17 | 2,25 | 4,4 |
| $Fe_2O_3$ | 6,15 | 2,47 | 5,4 |
| $SO_3$ | 2,81 | – | 3,5 |
| $K_2O$ | 1,28 | – | 0,5 |
| $Na_2O$ | 1,25 | 0,58 | 1,3 |
| MgO | 1,57 | – | 2,5 |
| CaO | 1,48 | 0,51 | 59,5 |
| $P_2O_5$ | 1,63 | – | – |
| п.п.п* | 5,04 | 2,54 | 2,5 |
| Средний размер частиц, мкм | 7,18 | 0,243 | 8,365 |
| Истинная плотность, г/см$^3$ | 2,25 | 2,15 | 3,15 |
| Насыпная плотность, кг/м$^3$ | 572 | 765 | 1100 |
| Удельная поверхность, м$^2$/г | 5,342 | 14,455 | 0,365 |

Примечание. * п.п.п – потери при прокаливании.




*а – по расплыву конуса; б – определение результата испытаний*

**Рис. 1.** ***Встряхивающий столик для определения удобоукладываемости бетонной смеси, пригодной для 3D-печати***

дисперсных материалов даны в *табл. 2*.

В качестве заполнителя применяли кварцевый песок (П) р. Ло (Вьетнам) в соответствии с требованиями ГОСТ 8736[6] и TCVN 7570[7]. Физико-механические свойства песка следующие:

модуль крупности . . . . . 3,1
истинная плотность, г/см$^3$ . . 2,65
насыпная плотность, г/см$^3$ . . 1,54
пустотность, % . . . . . 41,8
содержание пыли, глины и других примесей, % . . . . . 1,25

Выбрали суперпластификатор (СП) типа G для бетона торговой марки Sung Shin Vina SR3000S производства вьетнамского филиала компании Sika (Швейцария), соответствующий требованиям ГОСТ 24211[8] и TCVN 8826[9]. Этот суперпластификатор на основе поликарбоксилатного эфира с плотностью водного раствора рабочей концентрации 1,12±0,2 г/см$^3$ и водоредуцирующей способностью порядка 20–30 %.

Водопроводную воду (В) использовали как воду затворения для получения бетонной смеси согласно ГОСТ 23732[10] и TCVN 4506[11].

Методы исследований были следующие:

- размеры частиц сыпучих сырьевых материалов устанавливали методом лазерной гранулометрии на приборе BT-9300z (КНР);
- для проектирования предварительного состава мелкозернистой бетонной смеси применяли метод абсолютных объемов;
- удобоукладываемость бетонной смеси определяли по ее расплыву, мм, на встряхивающем столике по ГОСТ 10181[12] и TCVN 3121-3[13] с помощью усе-

6 ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия».

7 TCVN 7570:2006 «Aggregates for concrete and mortar – Specifications» [Заполнители для бетона и раствора – технические характеристики].

8 ГОСТ 24211–2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия».

9 TCVN 8826:2011 «Chemical admixtures for concrete» [Химические добавки для бетона].

10 ГОСТ 23732–2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия».

11 TCVN 4506:2012 «Water for concrete and mortar. Technical conditions» [Вода для бетона и раствора. Технические условия].

12 ГОСТ 10181–2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний».

13 TCVN 3121-3:2003 «Mortar for masonry – Test methods. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)» [Раствор для кладки – методы испытаний. Ч. 3. Определение консистенции свежеприготовленного строительного раствора (по технологической таблице)].

ченного мини-конуса размером 100×70×60 мм *(рис. 1)*;

• минеральный состав сырьевых компонентов и фазовый состав разработанного бетона исследовали при рентгенофазовом анализе на порошковом рентгеновском дифрактометре XDA-D8 Advance фирмы Bruker (ФРГ) в Институте строительной науки и технологии (СРВ);

• микроструктуру бетона изучали сканирующим электронным микроскопом Quanta-450 (Япония) в Институте высоких технологий Ханойского горно-геологического университета;

• среднюю плотность бетонной смеси после ее приготовления определяли путем взвешивания и измерения объема в стандартной мерной емкости (объем 1 л) в соответствии с ГОСТ 10181[12], TCVN 3105[14] и TCVN 3108[15];

• среднюю плотность бетона устанавливали на образцах-кубах размером 100×100×100 мм согласно ГОСТ 12730.1[16] и TCVN 3115[17];

• прочность бетона на растяжение при изгибе и при сжатии в возрасте 3, 7, 14 и 28 сут получали при испытании образцов-призм размером 40×40×160 мм в соответствии с требованиями TCVN 3121-11[18].

### Метод определения печатных свойств бетонных смесей

В основе конструкции устройства, использованного в лаборатории для проверки пригодности разработанных мелкозернистых бетонных смесей к применению методом 3D-печати, лежит экструзионный механизм в виде плунжера объемом 100 мл с печатающим соплом длиной 150 мм и диаметром 10 мм на выходе *(рис. 2)*.

Пригодность бетонных смесей к использованию указанным методом оценивается тем, что они должны выдавливаться из сопла и сохранять приданную им форму под действием собственного веса, а также нагрузок, возникающих за счет укладки поверх них следующих слоев бетонной смеси [13, 14]. В данном исследовании пригодность бетонной смеси к 3D-печати оценивалась по следующим критериям:

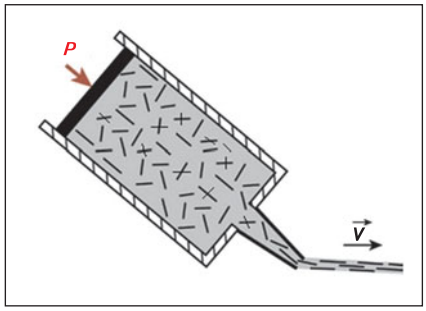



**Рис. 2.** *Схема плунжера*

• слой бетона, образующийся в результате экструзии бетонной смеси, должен быть непрерывным, длиной 1,2 м;

• печатные бетонные слои данной длины должны сохранять приданную им форму при нанесении их друг на друга в два или три слоя.

### Проектирование составов бетонных смесей для печати на 3D-принтере

В настоящее время составы бетонных смесей, пригодных для 3D-печати, определяют опытным путем, с последующей коррекцией предварительного теоретически рассчитанного состава на основании полученных экспериментальных результатов.

Ле Трунг Тхань и его коллеги из Института строительных материалов Министерства строительства Вьетнама предложили улучшенные соотношения между сырьевыми компонентами для проектирования составов бетонных смесей, применяемых в технологии 3D-печати [7, 11, 15]. Путем использования указанных соотношений можно спроектировать бетонные смеси, обладающие хорошей удобоукладываемостью при продолжительности печати 1 ч и позволяющие получить бетоны с прочностью при сжатии от 50 до 78 МПа в возрасте 28 сут.

Согласно методу абсолютных объемов (1) для получения бетона плотной структуры расход всех сырьевых компонентов должен быть таким, чтобы сумма их абсолютных объемов составляла 1000 л, т. е. 1 м$^3$ уплотненной бетонной смеси [8, 11, 14]:

$$\frac{Ц}{\gamma_{Ц}} + \frac{ЗУ}{\gamma_{ЗУ}} + \frac{МК90}{\gamma_{МК90}} + \frac{П}{\gamma_{П}} + \frac{В}{\gamma_{В}} + \frac{СП}{\gamma_{СП}} = 1000, \quad (1)$$

где Ц, ЗУ, МК90, П, В, СП — соответственно расходы портландцемента, золы-уноса, микрокремнезема, песка, воды и суперпластификатора, кг; $\gamma_{Ц}$, $\gamma_{ЗУ}$, $\gamma_{МК90}$, $\gamma_{П}$, $\gamma_{В}$ и $\gamma_{СП}$ — их истинные плотности, г/см$^3$.

В соответствии с ГОСТ 25192[19] и TCVN 10306[20] высокопрочный бетон — это бетон класса прочности при сжатии начиная с В55 и обладающий средней прочностью при сжатии в возрасте 28 сут нормального твердения не ниже 70 МПа. Исходя из этого первоначальный состав рассчитывался для получения бетона с указанной

[14] TCVN 3105:1993 «Heavyweight concrete compound and heavyweight concrete — Samling, making and curing of test specimens» [Тяжелая бетонная смесь и тяжелый бетон — отбор проб, изготовление и твердение образцов для испытаний].

[15] TCVN 3108:1993 «Heavyweight concrete compounds — Method for determination of density» [Тяжелые бетонные смеси. Метод определения плотности].

[16] ГОСТ 12730.1—2020 «Бетоны. Методы определения плотности».

[17] TCVN 3115:1993 «Heavyweight concrete — Method for determination of density» [Тяжелый бетон — метод определения плотности].

[18] TCVN 3121-11:2003 «Mortar for masonry — Test methods. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortars» [Раствор для кладки — методы испытаний. Ч. 11. Определение прочности при изгибе и сжатии затвердевших растворов].

[19] ГОСТ 25192—2012 «Бетоны. Классификация и общие технические требования».

[20] TCVN 10306:2014 «High strength concrete — Proportional design with cylinder sample» [Высокопрочный бетон — пропорциональный расчет с использованием образцов-цилиндров].

*3. Составы и свойства мелкозернистых бетонных смесей для 3D-печати*

| Состав | В/Вяж | П/Вяж | Расход материалов на 1 м$^3$ бетонной смеси, кг | | | | | | Средняя плотность бетонной смеси, кг/м$^3$ | Расплыв конуса, мм |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Ц | ЗУ | МК90 | В | П | СП | | |
| I3D-01 | 0,35 | 0,67 | 716 | 204 | 102 | 358 | 685 | 2,25 | 2073 | 165 |
| I3D-02 | | 1 | 633 | 181 | 90 | 317 | 904 | 1,99 | 2145 | 155 |
| I3D-03 | 0,4 | 0,67 | 680 | 194 | 97 | 389 | 651 | 2,14 | 2054 | 195 |
| I3D-04 | | 1 | 605 | 173 | 86 | 346 | 864 | 1,9 | 2098 | 175 |

прочностью при сжатии при удобоукладываемости мелкозернистой бетонной смеси по расплыву конуса (150—200 мм) на встряхивающем столике.

Соотношения между использованными сырьевыми материалами в работе были определены на основании результатов многочисленных исследований мелкозернистых бетонов, а также рекомендованных в научно-технической литературе составов бетонных смесей для 3D-печати [2—4, 7, 8, 10].

Многокомпонентное вяжущее (Вяж) состояло из 70 % по массе портландцемента завода «Бут Сон», 20 % по массе золы-уноса ТЭС «Фа Лай» и 10 % по массе микрокремнезема SF-90 (Вяж = = Ц + ЗУ + МК90).

Водовяжущие отношения (В/Вяж) в этом исследовании были выбраны равными 0,35 и 0,4 исходя из результатов исследования свойств бетонов, полученных с помощью 3D-печати [8, 15].

Соотношения между песком и вяжущим (П/Вяж) установлены 0,67 и 1 на основании результатов проведенных ранее исследований [7, 11].

Количество суперпластификатора, обеспечивающее требуемый расплыв конуса бетонной смеси на встряхивающем столике, согласно работе [15] было принято равным 0,22 % массы разработанного многокомпонентного вяжущего.

Содержание воздуха, вовлеченного в бетонную смесь в ходе ее приготовления, составляло 2 % ее объема.

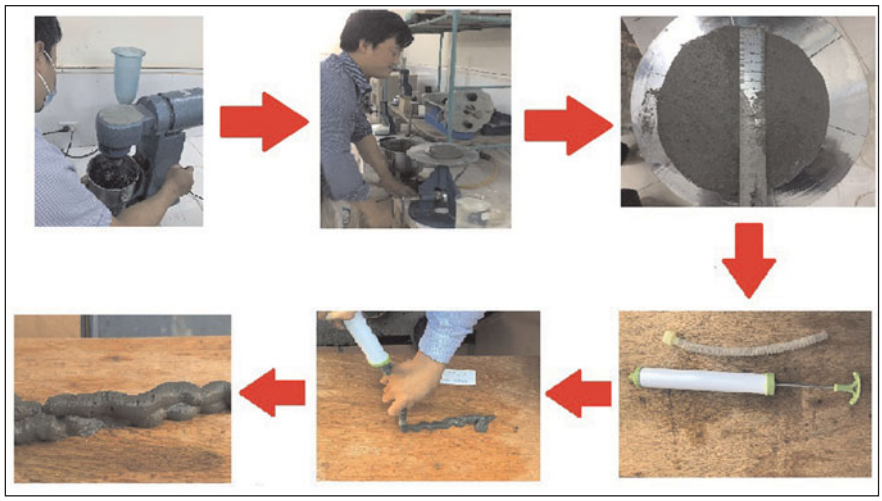


**Рис. 3.** *Получение бетонной смеси и ее испытание на пригодность для печати на 3D-принтере*

На основании вышеизложенного и согласно результатам предварительно проведенных экспериментальных исследований были выбраны следующие соотношения по массе между сырьевыми компонентами в бетонной смеси:

Ц/Вяж . . . . . 0,7
В/Вяж . . . . . 0,35 и 0,4
П/Вяж . . . . . 0,67 и 1
ЗУ/Вяж . . . . . 0,2
МК90/Вяж . . . . . 0,1
СП/Вяж . . . . . 0,0022

С помощью метода абсолютных объемов, а также последующей корректировки на основании экспериментальных результатов были рассчитаны составы бетонных смесей для получения 3D-печатных бетонов с прочностью при сжатии не ниже 70 МПа в возрасте 28 сут. Составы исследованных бетонных смесей приведены в *табл. 3.*

Исходя из имевшегося лабораторного оборудования была разработана и реализована на практике последовательность приготовления бетонной смеси для последующей 3D-печати:

- смесь сухих сыпучих материалов (цемент, зола-уноса, микрокремнезем и песок) помещали в смесительную чашу 5-литрового миксера для приготовления цементных растворов (растворосмеситель Хобарта) и медленно перемешивали в течение 2 мин;
- параллельно в другом смесителе смешивали около 70 % воды затворения с суперпластификатором до получения однородного раствора, который затем постепенно вливали в растворосмеситель с перемешанными сухими материалами и продолжали

*4. Физико-механические свойства разработанных мелкозернистых бетонов*

| Состав | В/Вяж | Средняя плотность, кг/м$^3$ | Прочность на растяжение при изгибе/ при сжатии, МПа, в разных возрастах твердения | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 3 сут | 7 сут | 14 сут | 28 сут |
| I3D-01 | 0,35 | 2025 | 3,38/38,5 | 4,64/51,8 | 5,78/65,7 | 6,4/74,5 |
| I3D-02 | | 2137 | 3,24/37,1 | 4,41/49,1 | 5,52/63,8 | 6,03/73,1 |
| I3D-03 | 0,4 | 2011 | 2,97/34,7 | 3,79/44,2 | 4,79/60,9 | 5,49/70,6 |
| I3D-04 | | 2057 | 3,14/35,7 | 4,05/46,6 | 5,01/62,1 | 5,62/72 |

*5. Оценка печатных свойств мелкозернистых бетонных смесей разработанных составов*

| Состав | В/Вяж | П/Вяж | Оценка пригодности бетонной смеси для 3D-печати |
|---|---|---|---|
| I3D-01 | 0,35 | 0,67 | Образующаяся печатная бетонная лента обладает непрерывностью, ее поверхность имеет много пор, но достаточно гладкая. Печатные бетонные слои держат форму под собственным весом и весом вышеуложенных слоев |
| I3D-02 | | 1 | Печатная бетонная лента имеет те же характеристики, но слои труднее экструдировать из-за более высокого содержания песка в бетонной смеси |
| I3D-03 | 0,4 | 0,67 | Экструдируемые слои бетона обеспечивают формирование непрерывной бетонной ленты, но она более влажная из-за возросшего содержание воды в бетонной смеси. Бетонные слои не выдерживают веса вышеуложенных слоев, в результате этого наблюдается их деформация и коробление |
| I3D-04 | | 1 | Образующаяся печатная бетонная лента прерывистая, деформированная на 1—2 мм по сравнению с размером сопла. Экструдирование бетонной смеси затруднено, поскольку соотношение между песком и вяжущим увеличено с 0,67 до 1 |

перемешивание еще 1—2 мин, постепенно увеличивая скорость;

• после этого в полученную смесь добавляли оставшиеся 30 % воды и продолжали перемешивание с высокой скоростью еще в течение 1—1,5 мин до получения гомогенной высокоподвижной мелкозернистой бетонной смеси.

Бетонную смесь после получения положительного результата определения ее требуемой удобоукладываемости на встряхивающем столике проверяли на пригодность для 3D-печати *(рис. 3)*:

• пробу бетонной смеси объемом 100 мл помещали в плунжерное экструзионное устройство 3D-принтера, затем плунжер устанавливали на место в 3D-принтер и прикрепляли к его выходной части петлю печатающего сопла;

• проверяли пригодность бетонной смеси к печати при скорости движения печатающей головки около 40 мм/с.

### Результаты исследования

В соответствии с действующими стандартами России и Вьетнама в лабораторных условиях были определены расплыв на встряхивающем столике и средняя плотность мелкозернистых бетонных смесей разработанных составов (*см. табл. 3*).

На основании экспериментальных результатов можно отметить следующее:

• средняя плотность мелкозернистых бетонных смесей, разработанных для печати на 3D-принтере, находится в интервале от 2073 до 2145 кг/м$^3$ и имеет довольно низкое значение по сравнению с обычно используемыми цементно-песчаными бетонными смесями. Это можно объяснить повышенным содержанием вяжущего и воды несмотря на низкие водовяжущие отношения, а также снижением доли песка в разработанных мелкозернистых бетонных смесях;

• величина расплыва конуса мелкозернистых бетонных смесей на встряхивающем столике сильно зависит от соотношений между водой и вяжущим, песком и вяжущим. Для бетонных смесей с соотношением П/Вяж = = 0,67 с повышением В/Вяж с 0,35 до 0,4 расплыв конуса увеличился с 165 до 195 мм, а для смесей с П/Вяж = 1 при таком же росте В/Вяж также наблюдалось увеличение расплыва конуса, но в меньшей степени — с 155 до 175 мм.

Кроме того, можно отметить, что благодаря правильно произведенному подбору состава и использованию суперпластификатора полученные бетонные смеси были однородными, без признаков расслоения и обладали требуемой удобоукладываемостью.

Среднюю плотность затвердевших мелкозернистых бетонов определяли на основе разработанных бетонных смесей, а также устанавливали их прочности при сжатии и на растяжение при изгибе в возрасте твердения 3, 7, 14 и 28 сут (*табл. 4*).

Рост прочности на растяжение при изгибе и при сжатии мелкозернистых бетонов разработан-

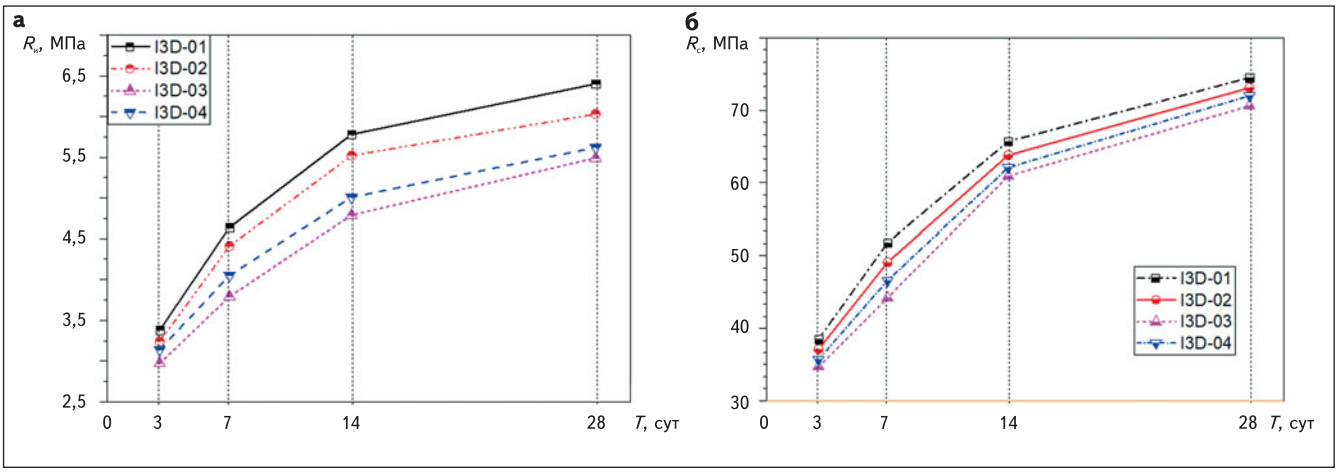



**Рис. 4.** *Графики прочности на растяжение при изгибе (а) и при сжатии (б) разработанных мелкозернистых бетонов во времени*

**Рис. 5.** *Тестовый процесс для оценки пригодности бетонной смеси для печати*

**Рис. 6.** *Непрерывные экструдированные бетонные ленты из мелкозернистой бетонной смеси состава I3D-01*

ных составов с возрастом их твердения представлен на *рис. 4*.

Из данных, приведенных в *табл. 4*, видно, что при увеличении водовяжущего отношения с 0,35 до 0,4 наблюдается закономерное снижение прочности мелкозернистых бетонов как на растяжение при изгибе, так и при сжатии. При этом наибольшее значение прочности при сжатии в возрасте 28 сут, равное 74,5 МПа, имел бетон состава I3D-01 с В/Вяж = 0,35 и П/Вяж = 0,67, а наименьшее значение 70,6 МПа — бетон состава I3D-03 с В/Вяж = 0,4 и таким же П/Вяж.

Темп набора прочности экструдированных мелкозернистых бетонов разработанных составов довольно высок, и их прочность при сжатии в возрасте 3, 7 и 14 сут составила соответственно порядка 50, 65 и 87 % прочности в возрасте 28 сут *(см. рис. 4)*.

Критериями пригодности разработанных мелкозернистых бетонных смесей для печати на 3D-принтере служат их способность легко экструдироваться из печатающей головки и образовывать сплошную бетонную ленту, сохраняющую приданную форму под действием нагрузки со стороны вышеуложенных бетонных слоев. Испытания проводились с помощью лабораторного устройства собственного изготовления *(см. рис. 3)*. Проведение испытаний показано на *рис. 5*.

Результаты экспериментальной оценки печатных свойств разработанных мелкозернистых бетонных смесей представлены в *табл. 5*.

Полученные результаты показывают, что из четырех разработанных составов мелкозернистых бетонных смесей больше всего пригодна для печати на 3D-принтере бетонная смесь состава I3D-01 *(рис. 6)*, поскольку она легко экструдируется и образует непрерывную бетонную ленту с достаточно гладкой поверхностью, способную сохранять свою форму под действием собственного веса и веса вышеуложенных бетонных слоев.

## Выводы

**1.** Мелкозернистые бетонные смеси для 3D-печати могут быть изготовлены из доступных во Вьетнаме сырьевых материалов, таких как портландцемент PC40 производства завода «Бут Сон», низкокальциевая зола-уноса ТЭС «Фа Лай», микрокремнезем SF-90, речной кварцевый песок с модулем крупности Мк = 3,1, поликарбоксилатный суперпластификатор и вода.

**2.** На пригодность мелкозернистой бетонной смеси для печати сильно влияют водовяжущее и песчано-вяжущее отношения. При этом наилучшие результаты в плане получения сплошной и гладкой отпечатанной поверхности бетонной ленты показала смесь с В/Вяж = 0,35 и П/Вяж = 0,67, содержащая в составе разработанного многокомпонентного вя-

жущего на основе портландцемента 10 % по массе микрокремнезема и 20 % по массе золы-уноса.

**3.** Консистенция мелкозернистой бетонной смеси, пригодной для 3D-печати, должна обеспечивать расплыв конуса на встряхивающем столике в диапазоне от 155 до 195 мм.

**4.** В результате затвердевания экструдированных мелкозернистых бетонных смесей разработанных составов были получены бетоны со средней плотностью 2011–2137 кг/м$^3$, с 28-суточной прочностью при сжатии от 70,6 до 74,5 МПа и на растяжение при изгибе 5,49–6,4 МПа. Прочность бетонов при сжатии в возрасте 3, 7 и 14 сут составила соответственно порядка 50, 65 и 87 % прочности в возрасте 28 сут.

*Авторы статьи выражают благодарность руководству лаборатории подземного строительства Ханойского горно-геологического университета за помощь в проведении экспериментов в рамках данного исследования.*

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES


1. Luu Van Thuc, Tran Quang Dung, Nguyen Thi Dieu Thuy. 3D concrete printing technology – Development orientation and application in Vietnam [Технология 3D-печати бетона – направление разработки и применения во Вьетнаме]. *NUCE Journal of Construction Technology*, 2018, vol. 12, no. 6, pp. 49–56. (In Viet.).
2. Sanjayan J. G., Nazari A., Nematollahi B. *3D concrete printing technology: construction and building applications* [Технология 3D-печати бетона: применение в строительстве и зданиях]. Butterworth-Heinemann, 2019. 404 p.
3. Li Z., Hojati M., Wu Z. et al. Fresh and hardened properties of extrusion-based 3D-printed cementitious materials: a review [Свойства свежих и затвердевших цементных материалов, напечатанных методом экструзии на 3D-принтере: обзор]. *Sustainability*, 2020, vol. 12(14), p. 33.
4. Kearney A. T. *3D printing: A manufacturing revolution* [3D-печать: революция в производстве]. Korea, 2015. 45 p.
5. Roussel N. Rheological requirements for printable concretes [Реологические требования к печатным бетонам]. *Cement and Concrete Research*, 2018, vol. 112, pp. 76–85.
6. Sanjayan J. G., Nematollahi B., Xia M., Marchment T. Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete [Влияние поверхностной влаги на межслойную прочность 3D-печатного бетона]. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 172. pp. 468–475. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.232
7. Le Trung Thanh. Research and development of concrete 3D printing technology at Institute of Building Materials [Исследование и разработка технологии 3D-печати бетона в Институте строительных материалов]. *Scientific conference "Concrete 3D printing technology – Opportunities and challenges"*. Institute of Building Materials (Ministry of Construction). January, 2021. 15 p. (In Viet.).
8. Tran Van Mien. Research and development of concrete 3D printing materials at Ho Chi Minh City University of Technology [Исследование и разработка бетонных материалов для 3D-печати в Технологическом университете Хошимина]. *Ibid*. 11 p. (In Viet.).
9. Zhang Y., Zhang Y., Liu G. et al. Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink [Свойства новых бетонных чернил для 3D-печати]. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 174, pp. 263–271.
10. Tran Van Mien, Huynh Cong Tam, Le Hoang Giang, Nguyen Quoc Cuong. Improving adhesion between 3D printed concrete layers by modified cement paste [Усиление сцепления между слоями бетона, напечатанными на 3D-принтере с помощью модифицированного цементного теста]. *Journal of Materials and Construction* (Ministry of Construction), 2021, vol. 11, iss. 6, 10 p. (In Viet.).
11. Nguyen Van Tuan, Le Viet Hung. Research and development of concrete 3D printing materials [Исследование и разработка бетонных материалов для 3D-печати]. *Scientific conference "Concrete 3D printing technology – Opportunities and challenges"*. Institute of Building Materials (Ministry of Construction), January, 2021. 11 p. (In Viet.).
12. Jo J. H., Jo B. W., Cho W., Kim J. H. Development of a 3D printer for concrete structures: laboratory testing of cementitious materials [Разработка 3D-принтера для бетонных конструкций: лабораторные испытания вяжущих материалов]. *International Journal Concrete Structures Materials*, 2020, vol. 14, no. 1, 11 p. doi: 10.1186/s40069-019-0388-2
13. Tran Van Mien, Nguyen Hoang Phuoc, Nguyen Thanh Thai, Nguyen Tien Dung. Effect of concrete mix plasticity on 3D printing ability [Влияние пластичности бетонной смеси на 3D-печать]. *Journal of Materials and Construction* (Ministry of Construction), 2021, no. 04, pp. 21–25. (In Viet.).
14. Tang Van Lam. Research on the possibility of using high-strength fine aggregate concrete for 3D concrete printing technology [Исследование возможности использования высокопрочного мелкозернистого бетона для технологии 3D-печати бетона]. *Journal of Construction Science and Technology*, 2022, no. 3, pp. 19–26. (In Viet.).
15. Vu Van Linh, Le Viet Hung, Le Trung Thanh et al. Some experimental research results on 3D printed concrete [Некоторые результаты экспериментальных исследований бетона, напечатанного на 3D-принтере]. *Journal of Materials and Construction* (Ministry of Construction), 2021, vol. 11, iss. 6, pp. 16–24. (In Viet.).