

DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2020.19.3>

## ПРИГОДНОСТЬ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ НА ПОЛЫХ МИКРОСФЕРАХ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Научная статья

Зыонг Т.К.<sup>1</sup>, Иноземцев А.С.<sup>2,\*</sup>

<sup>2</sup>ORCID: 0000-0001-7807-688X

<sup>1,2</sup>Национальный исследовательский Московский Государственный строительный университет, Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (InozemcevAS[at]mgsu.ru)

### Аннотация

В работе исследованы особенности реологических свойств высокопрочных легких бетонов на полых микросферах средней плотностью 1400 кг/м<sup>3</sup>. На основе как стандартизированных методик исследования подвижности бетонной смеси, так и дополнительных критериев сохраняемости установлено, что обладают высокой пригодностью для 3D-печати в строительстве. Показано, что исследуемые бетонные смеси при варьировании содержания пластифицирующей добавки, могут обеспечивать сохранение объема более 90 % при подвижности до 135 мм по диаметру расплыва конуса. Содержание пластификатора не более 1,2 % от массы цемента обеспечивает для исследуемых смесей вариативность интенсивности разжижения.

**Ключевые слова:** 3D-печать, высокопрочный легкий бетон, реология, тиксотропия, экструзия.

## PRINTABILITY OF CONCRETE MIXTURES FILLED BY HOLLOW MICROSPHERES FOR 3D-PRINTING IN CONSTRUCTION

Research article

Duong T.Q.<sup>1</sup>, Inozemtcev A.S.<sup>2,\*</sup>

<sup>2</sup>ORCID: 0000-0001-7807-688X

<sup>1,2</sup>National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

\* Corresponding author (InozemcevAS[at]mgsu.ru)

### Abstract

The features of the rheological properties of high-strength lightweight concrete filled by hollow microspheres with an average density of 1400 kg/m<sup>3</sup> were investigated in the work. Based on both standardized methods for studying the mobility of concrete mixtures and additional criteria for buildability, it has been established that studied mixtures have high printability in construction. It is shown that the high-strength lightweight concrete mixtures, with varying the concentration of the plasticizer, can keep a volume after extrusion of more than 90 % and have the flow diameter of up to 135 mm. The content of the plasticizer is not more than 1.2 % by weight of the cement provides variability of the intensity of liquefaction.

**Keywords:** 3D-printing, high-strength lightweight concrete, rheology, thixotropy, extrusion.

### Введение

Мировой опыт разработки оборудования для строительной 3D-печати [1–5] показывает, что в зависимости от особенностей экструзионной головки принтера подвижность бетонная смесь подбирается в широком диапазоне реологических свойств. Принципиальной технологической особенностью процесса экструзии является наличие или отсутствует непосредственного формования слоя. В первом случае подача бетонной смеси осуществляется по принципу безопалубочного формования (рис. 1,а [1]) с помощью экструзионного сопла прямоугольного сечения. Во втором – происходит исключительно подача смеси из сопла, как правило, круглого сечения, с неконтролируемым формированием слоя (рис. 1, б [2]). Требования к бетонной смеси по вязко-текучим свойствам для каждого из способов существенно отличаются.

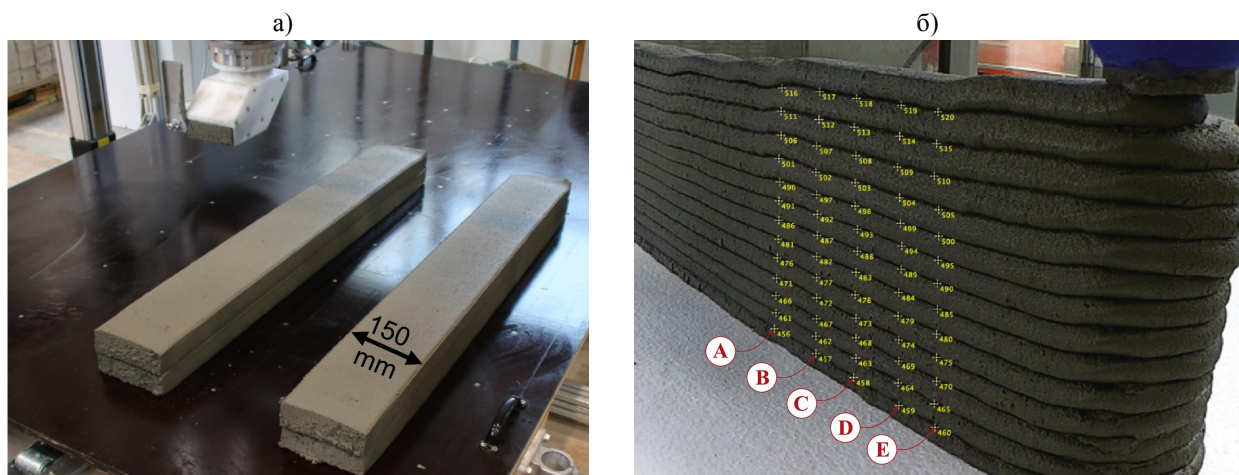


Рис. 1 – Экструдированные слои бетона с формующей (а) и не формующей (б) головкой принтера

В качестве основных критериев для бетонных смесей в технологии 3D-печати выделяют формуемость или экструдруемость (extrudability), текучесть (flowability), сохранение объема (buildability) и сохранение подвижности (open time), вариативность которых должны обеспечить непрерывность формирования слоя через сопло принтера, высокая подвижность – минимальную деформацию после экструзии последующего слоя и максимальное время сохранения для межслойного сцепления [3].

Специфика этих свойств и взаимная зависимость осложняет универсализацию их количественной оценки с помощью стандартных методов испытания. При этом различные конструкционные особенности 3D-принтеров (в том числе системы подачи и экструзии) требуют индивидуального подхода к выбору «приемлемой» пригодности бетонной смеси для печати (printability).

В [4] пригодность для 3D-печати оценена по величине диаметра расплыва из усеченного конуса (ASTM C1437-0) и составляет 17,4...21,0 см. Авторы [5] использовали для оценки качества бетонной смеси показатель цилиндрической стабильности, рассчитываемый по величине осевой деформации цилиндра при статической нагрузке. Величина относительной усадки исследуемых смесей составила 15,0...48,5 % от начальной высоты.

Дисперсные системы на основе цемента обычно рассматриваются как тиксотропный материал, способный разжижаться при механическом воздействии и загустевать при снятии нагрузки. При этом описание напряжения сдвига ( $\tau$ ) от скорости сдвига ( $\dot{\gamma}$ ) осуществляется с помощью модели Гершеля-Балкли:

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

где  $\tau_0$  – предельное напряжение сдвига,  $K$  – показатель консистенции,  $n$  – показатель неньютоновского поведения.

Помимо деформации каждого единичного слоя в процессе печати нижние слои подвергаются дополнительному воздействию от последующих слоев, которое может приводить к пластическому разрушению конструкции (рис. 2 [2, 6]) вследствие их тиксотропного разжижения. При этом предельное значение зависит от плотности бетона ( $\rho$ ) и высоты конструкции ( $H$ ) [7]:

$$A_{\text{тих}} \geq \frac{\rho g H}{\sqrt{3}}, \quad (2)$$

где  $g$  – гравитационная постоянная.



Рис. 2 – Пластическое разрушение конструкции при 3D-печати

Очевидно, что конструкционным преимуществом в технологии 3D-печати обладают материалы с меньшей плотностью. Снижение средней плотности бетона для 3D-печати позволяет при равных реологических свойствах обеспечить большую высоту конструкции без пластической деформации. С учетом технико-экономической эффективности [8] перспективным является использования легких бетонов на полых микросферах в качестве «чернил» в технологии 3D-печати. Актуальной задачей является оптимизация реологических свойств таких бетонов для экструзионного формования.

#### Методы и принципы исследования

Объектом исследования является бетонная смесь высокопрочного легкого бетона средней плотностью  $1400 \text{ кг/м}^3$ , приготовленная в соответствии с [9], из портландцемента СЕМ I 42,5 N, АО «Липецкцемент», микрокремнезема МК-85 (ООО «НЛМК») истинной плотностью  $2200 \dots 2350 \text{ кг/м}^3$ , размером частиц  $1 \dots 100 \text{ мкм}$  и содержанием  $\text{SiO}_2$  не менее 97,8 %, кварцевого песка фр. 0,16-0,63 мм и муки кварцевого песка с удельной поверхностью  $700 \dots 800 \text{ м}^2/\text{кг}$ , затворенных водой с пластифицирующей добавкой «Melflux 1641F». В качестве легкого заполнителя, обеспечивающего снижение средней плотности бетона, использовались полые стеклянные микросферы «Foresphere 3000» (средний размер частиц 30 мкм).

Для исследования бетонной смеси использовались несколько методов, позволяющих оценить при различных условиях оценить реотехнологические свойства. При варьировании концентрации пластификатора определяли расплыв конуса на встряхивающем столике в соответствии с ГОСТ «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии». Сохранение формы оценивали по изменению объема цилиндра с соотношением диаметра к высоте 1:2.

С помощью ротационного вискозиметра MCR 101 (Anton Paar) выполнены исследования напряжения сдвига бетонной смеси в режиме осцилляции с постоянной угловой частотой колебания ( $3 \text{ рад/с}$ ) измерительной системы «шар» и амплитудой (100 %) в течение 5 минут.

#### Основные результаты и обсуждение

Как показано ранее [10...12] подвижность высокопрочных легких бетонов на полых микросферах обеспечивается использованием поликарбоксилатного пластификатора. Варьирование его количества позволит уставить паритетное сочетание текучести и вязкости для обеспечения пригодности для печати.

Бетонная смесь после экструзии из сопла 3D-принтера под действие собственного веса изменяет первоначальную форму. Обеспечение минимальной деформации слоя является важным для таких смесей. количественную оценку таких деформаций можно осуществлять по величине вертикальной осадки, но вертикальная деформация не в полной мере отражает изменение объема, так как слой также изменяется и в горизонтальной плоскости, что не менее важно при печати.

Для оценки сохраняемости формы (buildability) использовался вискозиметр Суттарда. Так как после извлечения из цилиндра вискозиметра изменению подвержена как высота, так и диаметры, то в качестве критериев сохраняемости бетонной смеси следует принимать параметр, учитывающий эти изменения. В исходном состоянии объем смеси занимает форму цилиндра вискозиметра, где наибольший и наименьший диаметры равны  $D_1 = D_2$ , поэтому объем, рассчитанный для каждого из них при  $H = H_0$  равны  $V_1 = V_2$  (рис. 3). Тогда максимальная сохраняемость формы, выраженная через отношение будет  $V_1/V_2 = 1$ . На образцах бетонной смеси после деформации объемы цилиндров, рассчитанных по  $D_1$  и  $D_2$ , будут отличаться, приводя к изменению  $V_1/V_2$ .

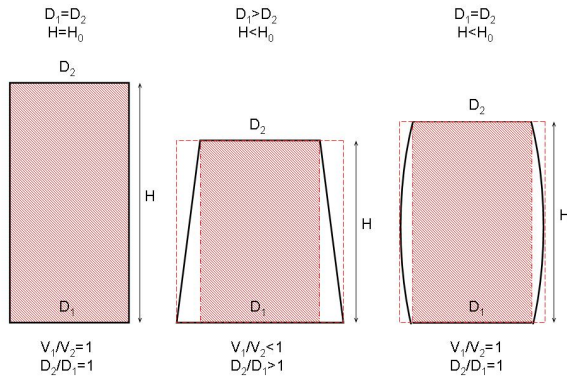


Рис. 3 – Изменение объемов описанных цилиндров



Рис. 4 – Характер деформации цилиндра бетонной смеси

Таким образом, отношения объемов  $V_1/V_2$  и высот  $H/H_0 \rightarrow 1$  характеризуют бетонную смесь с наилучшей сохраняемостью формы. Результаты исследования подвижности и сохраняемости бетонных смесей высокопрочного легкого бетона представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Реотехнологические свойства бетонных смесей для 3D-печати

№	Содержание пластификатора, % от массы портландцемента	Диаметр расплыва, $D_p$ , мм	Сохранение формы, $V_1/V_2$	Относительная деформация, $H/H_0$
1	1,0	128,8	0,97	0,95
2	1,1	135,0	0,94	0,93
3	1,2	160,3	0,88	0,90
4	1,3	165,0	0,83	0,84
5	1,4	181,8	0,62	0,78

Как видно из таблицы № 1 увеличение диаметра расплыва бетонной смеси за счет увеличения концентрации пластификатора сопровождается снижением сохраняемости формы. При этом более 90 % формы цилиндра сохраняется при содержании пластификатора не более 1,1 % от массы портландцемента. Это соответствует подвижности смеси по стандартизированной методике 135 мм.

На рис. 5 показано, как реологические свойства смеси влияют на геометрию экструдированных слоев. Видно, что увеличение количества пластификатора, приводящее к увеличению подвижности смеси, способствует ухудшению сохраняемости формы слоев. Сечение экструдированных слоев изменяется пропорционально и соответствует установленным с помощью цилиндра деформациям.



Рис. 5 – Деформации экструдированных слоев высокопрочного легкого бетона в горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) плоскости

Исследование тиксотропии бетонных смесей высокопрочных легких бетонов с помощью ротационного вискозиметра (рис. 6) показывают, варьирование содержания пластификатора влияет на интенсивность разжижения.

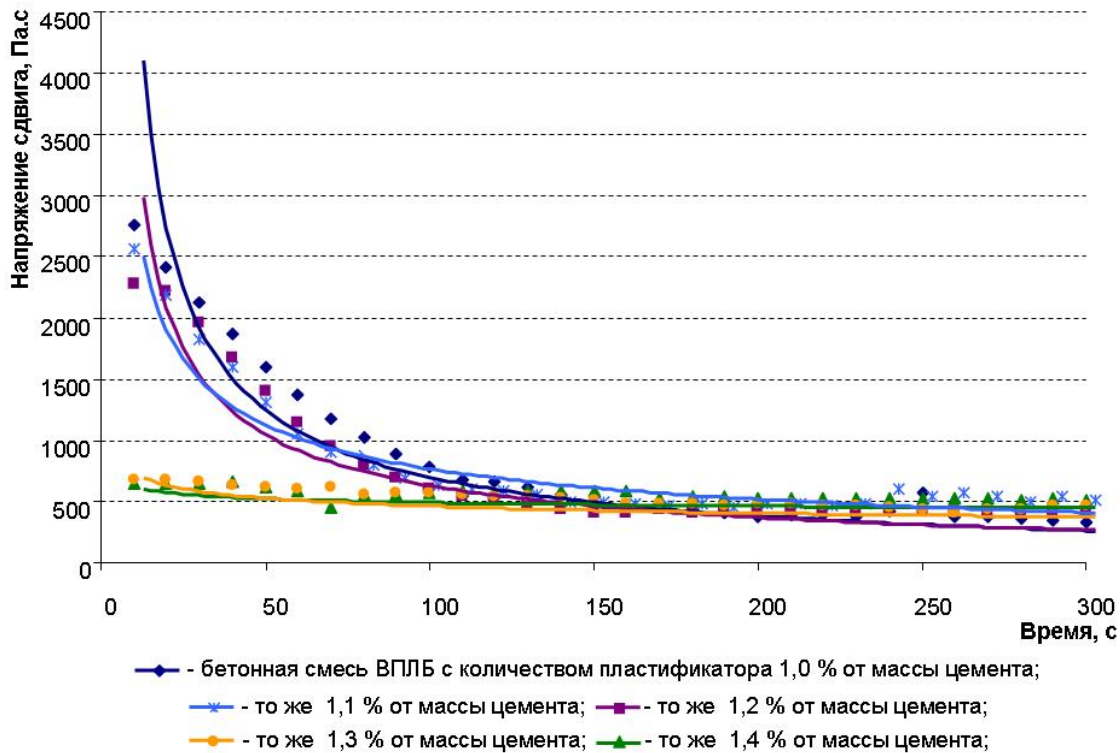


Рис. 6 – Изменение напряжения сдвига бетонной смеси высокопрочного легкого бетона от содержания пластификатора

Увеличение концентрации пластифицирующей добавки более быстрому достижению предельного значения напряжения сдвига. При этом минимальная величина напряжения сдвига для каждого из составов лежит в диапазоне 300...600 Па. Видно, что при содержании пластификатора более 1,3 % от массы цемента для разжижения бетонной смеси требуется минимальное время приложения постоянной сдвиговой нагрузки, что очевидно положительно для подачи ее к печатной головке. Однако, сопоставление результатов испытания в табл. 1 показывает, что начальная величина напряжения сдвига не позволяет обеспечить сохранение объема.

#### Заключение

Таким образом, исследование бетонных смесей высокопрочных легких бетонов на полых микросферах показывает, что для оптимизации реологических свойств для 3D-печати необходим поиск универсальной методики. Стандартизированные методы испытания требуют установления граничных диапазонов свойств, удовлетворяющих конкретным типам 3D-принтеров.

Установлено, что бетонные смеси на полых микросферах средней плотностью  $1400 \text{ кг/м}^3$  при варьировании содержания пластифицирующей добавки, могут обеспечивать сохранение объема более 90 % при подвижности до 135 мм по диаметру расплыва конуса. Содержание пластификатора не более 1,2 % от массы цемента обеспечивает для исследуемых смесей вариативность интенсивности разжижения. Исследуемые бетонные смеси обладают высокой пригодностью для 3D-печати в строительстве.

#### Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-1394.2020.8.

#### Список литературы / References

1. Mechtcherin V., Nerella V.N., Will F., Näther M., Otto J., Krause M. Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing // Automation in Construction. 2019. Vol. 107. 102933. doi: 10.1016/j.autcon.2019.102933.
2. Buswella R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 112. P. 37-49. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
3. Malaeb Z., AlSakka F., Hamzeh F. 3D Concrete Printing: Machine Design, Mix Proportioning, and Mix Comparison Between Different Machine Setups // 3D Concrete Printing Technology. 2019. P. 115-136. doi: 10.1016/B978-0-12-815481-6.00006-3.
4. Li Zh., Wang L., Ma G. Method for the Enhancement of Buildability and Bending Resistance of Three-Dimensional-Printable Tailing Mortar // 3D Concrete Printing Technology. 2019. P. 161-179. doi: 10.1186/s40069-018-0269-0.
5. Kazemian A., Yuan X., Cochran E., Khoshnevis B. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 145. P. 639-647.

6. Suiker A.S.J., Salet T.A.M., Lucas S.M., Wolfs R.J.M. Elastic buckling and plastic collapse during 3D concrete printing // *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 135. 106016. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015.
7. Jayathilakage R., Rajeev P., Sanjayan J.G. Yield stress criteria to assess the buildability of 3D concrete printing // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 240. 117989. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117989.
8. Inozemtcev A.S., Duong T.Q. Technical and economic efficiency of materials using 3D-printing in construction on the example of high-strength lightweight fiber-reinforced concrete // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. 02010. doi: 10.1051/e3sconf/20199702010.
9. Патент РФ 2515450. Высокопрочный легкий бетон / Королев Е.В., Иноземцев А.С. Заявл. 11.10.2012. Оpubл. 10.05.2014.
10. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Особенности реологических свойств высокопрочных легких бетонов на полых микросферах // *Вестник МГСУ*. 2013. № 6. С. 100-108.
11. Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Т.К. Реологические особенности цементно-минеральных систем, пластифицированных поликарбоксилатным пластификатором // *Региональная архитектура и строительство*. 2019. № 3 (40). С. 24-34.
12. Inozemtcev A.S. High-strength lightweight concrete mixtures based on hollow microspheres: technological features and industrial experience of preparation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 71. P. 012028. doi: 10.1088/1757-899X/71/1/012028.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. Mechtcherin V., Nerella V.N., Will F., Näther M., Otto J., Krause M. Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing // *Automation in Construction*. 2019. Vol. 107. 102933. doi: 10.1016/j.autcon.2019.102933.
2. Buswella R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 112. P. 37-49. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
3. Malaeb Z., AlSakka F., Hamzeh F. 3D Concrete Printing: Machine Design, Mix Proportioning, and Mix Comparison Between Different Machine Setups // *3D Concrete Printing Technology*. 2019. P. 115-136. doi: 10.1016/B978-0-12-815481-6.00006-3.
4. Li Zh., Wang L., Ma G. Method for the Enhancement of Buildability and Bending Resistance of Three-Dimensional-Printable Tailing Mortar // *3D Concrete Printing Technology*. 2019. P. 161-179. doi: 10.1186/s40069-018-0269-0.
5. Kazemian A., Yuan X., Cochran E., Khoshnevis B. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 145. pp. 639-647.
6. Suiker A.S.J., Salet T.A.M., Lucas S.M., Wolfs R.J.M. Elastic buckling and plastic collapse during 3D concrete printing // *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 135. 106016. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015.
7. Jayathilakage R., Rajeev P., Sanjayan J.G. Yield stress criteria to assess the buildability of 3D concrete printing // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 240. 117989. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117989.
8. Inozemtcev A.S., Duong T.Q. Technical and economic efficiency of materials using 3D-printing in construction on the example of high-strength lightweight fiber-reinforced concrete // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. 02010. doi: 10.1051/e3sconf/20199702010.
9. Patent RU 2515450. Vysokoprochnyj legkij beton [High-strength light concrete] / Korolev E.V., Inozemtcev A.S. Statem. 11.10.2012. Publ. 10.05.2014. [in Russian]
10. Inozemtcev A.S., Korolev E.V. Osobennosti reologicheskikh svoystv vysokoprochnykh legkih betonov na polyh mikrosferah [Peculiar rheological properties of high-strength lightweight concretes having hollow microspheres] // *Vestnik MGSU*. 2013. № 6. pp. 100-108. [in Russian]
11. Inozemtcev A.S., Korolev E.V., Duong T.Q. Reologicheskie osobennosti cementno-mineral'nyh sistem, plastificirovannyh polikarboksilatnym plastifikatorom [Rheological features of cement-mineral systems with a polycarboxylate plasticizer] // *Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo*. 2019. № 3 (40). pp. 24-34. [in Russian]
12. Inozemtcev A.S. High-strength lightweight concrete mixtures based on hollow microspheres: technological features and industrial experience of preparation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 71. P. 012028. doi: 10.1088/1757-899X/71/1/012028.