

Исследование изделий, полученных методом 3D-печати

С.В. Ключев^{1,2}, Е.В. Фомина², Н.А. Щекина², Е.С. Шорстова²,
Э.С. Сибгатуллин³, Ф.М. Ахметов³

¹Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы

²Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

³Набережночелнинский филиал Казанского (Приволжского) федерального
университета

Аннотация: Рассмотрены факторы, влияющие на прочность межслойной связи 3D-бетона, а также факторы, влияющие на возможность сопла принтера производить контролируемую бетонную нить того или иного состава, который исследуется в процессе технологии 3D-печати, основные характеристики пригодности составов для печати на 3D-принтере, требования к реологии, гидратации и прочности в незатвердевшем виде 3D-бетона, основные механические методы испытаний для определения прочности сцепления в бетоне, напечатанном на 3D-принтере. Приведены возможные формы и номинальные размеры образцов, которые используются в методах для определения прочности бетона.

Ключевые слова: 3D-бетон, анизотропия механических свойств, экструдирование, холодное соединение, межфазная связь, дефлокуляция, тиксотропия, начальная статическая вязкость, отверждение, трехточечный изгиб.

В последнее время все больше появляется возможность выбора новых и альтернативных материалов для создания аддитивного бетона с помощью 3D-принтера, комбинации составов смеси, разработка и моделирование показателей пригодности к печати. Данный вид строительства предлагает свободу дизайна, осуществимость возведения конструкции сложной формы и геометрии, массовую персонализацию, минимизацию отходов, сокращение сроков строительства и производственных затрат [1,2].

По сравнению с традиционным строительством, свойства свежесозданного бетона играют важную роль в его разработке, т.к. к 3D бетону предъявляются более высокие требования к реологии, гидратации и прочности в незатвердевшем виде, чем к обычному бетону. Способность сопла принтера производить контролируемую бетонную нить связана с возможностью печати того или иного состава, который исследуется в

процессе технологии 3D-печати. Выбранный состав должен соответствовать следующим характеристикам пригодности для печати:

- 1) Непрерывно экструдироваться без разрушения поверхности.
- 2) Не вызывать застревания бетона или засорения сопла.
- 3) Нарастивание массива бетона с приемлемой деформацией перед схватыванием [3,4,5].

Печать на 3D-принтере позволяет использовать составы с различными компонентами, главное, чтобы они отвечали всем предъявляемым требованиям. Необходимо изучить материалы, процессы, параметры печати и обеспечение качества для устройств печати. Важно при составлении смеси 3D-печати учитывать крупный наполнитель и переработанные материалы.

Для успешного процесса экструзии, т.е. для того, чтобы его можно было экструдировать через сопло, материал должен быть достаточно текучим. Одновременно экструдированный слой должен иметь достаточную прочность на сдвиг, чтобы противостоять деформациям из-за собственного веса и веса напечатанных над ним слоев. С реологической точки зрения, внутри насоса и сопла материал должен быть жидким с низкой вязкостью, но после печати он должен перейти в твердое состояние с достаточной прочностью, чтобы предотвратить деформацию.

Аддитивный бетон 3D-печати имеет множество новых ограничений и факторов, создающих слабую межфазную связь, которую часто называют «холодным соединением» из-за отсутствия перемешивания между слоями. Многослойная природа 3D-печати может привести к более пористым и слабым соединениям, что вызывает анизотропию механических свойств, снижение общей несущей способности и влияет на эксплуатацию и долговечность конструкций 3D-печати [7,8]. Показано [9], что прочность межслойной связи в 3D-печати связана с такими факторами, как: состав материала, способ смешивания [10], поверхностная влажность, временной

интервал нанесения между слоями [11], расстояние от сопла [12] до конструкции, скорость печати [13] и другие факторы окружающей среды.

Основные факторы, влияющие на прочность межслойной связи:

1. Влияние временного интервала между двумя укладываемыми слоями

В цементных материалах время является важным фактором, поскольку фазы процесса гидратации, также известные как зрелость бетона, со временем достигают разных стадий. Существует прямая зависимость между временем межслойного интервала и прочностью межслойной связи. Чем больше временной разрыв между нанесением последовательных слоев, тем менее эффективна межслойная связь. Это может быть связано с потерей поверхностной влаги. Тем не менее, температура и влажность также играют важную роль в уровне влажности на осажденных слоях.

2. Влияние расстояния до сопла

Расстояние от сопла до поверхности конструкции также играет важную роль в прочности соединения 3D-бетона. Более низкая прочность сцепления может быть получена при большем расстоянии от зазора. Исследования [13], показали, что увеличение расстояния отступа (отступающей границы слоя) с 0 мм до 2 мм и 4 мм привело к снижению прочности сцепления примерно на 23% и 35% соответственно. Эти результаты подчеркивают важность тщательного контроля расстояния до сопла при процессе 3D-печати для обеспечения достаточной прочности соединения слоев. Увеличение расстояния до сопла может способствовать образованию больших полостей на границе раздела между слоями. Эти полости могут стать ослаблениями структуры бетона, что, в свою очередь, может привести к снижению механических свойств и долговечности [6].

3. Влияние скорости печати

Скорость печати также играет важную роль в 3D-печати. Для успешной печати определенного типа смеси для 3D-бетона требуется оптимальная

скорость процессов. Это связано с реологическими свойствами смеси, такими как вязкость и текучесть материала. Скорость печати напрямую влияет на шероховатость поверхности. Было высказано предположение [13], что более высокая скорость печати приводит к меньшей шероховатости, что вызывает более низкую прочность сцепления. Высокая скорость печати с материалами низкой вязкости может привести к разрыву нити и нарушению процесса печати, тогда как низкая скорость с материалами высокой вязкости может привести к чрезмерному накоплению материала и ухудшению качества печати. Скорость печати является фактором, который необходимо координировать и оптимизировать. Эта оптимизированная скорость может варьироваться в зависимости от состава смеси, поскольку реологические свойства вяжущих смесей сильно различаются из-за различий в исходных материалах и составах смесей. Исследования, проведенные в источниках [9,10], подтверждают влияние скорости печати на прочность сцепления.

4. Влияние состава смеси и условий отверждения

Для 3D-бетона требуется высокоэффективная цементная смесь с контролируемыми свойствами материала, особенно на раннем этапе. Поскольку для 3D-бетона не используется опалубка, требуется материал с надлежащим пределом пластичности и вязкостью, чтобы гарантировать отсутствие деформации в существующем слое после нанесения на него последующего слоя. Требуется материал с высокой начальной статической вязкостью, который может подвергаться микроструктурным изменениям, чтобы стать менее вязким за счет дефлокуляции под действием приложенной силы (т. е. он был выдавлен и остановлен [14]). Такое поведение известно, как тиксотропия.

В связи с вышеизложенным, интерес исследователей к межуровневым соединениям аддитивного бетона для 3D-печати растет [7]. Исследования в сфере аддитивного бетона в основном сосредоточены на двух важных

аспектах: 1) повышение прочности связи между слоями [10]; 2) анизотропия механических свойств в результате межслойных соединений [19].

Измерение прочности межслойной связи в 3D-печати бетона является ключевым аспектом, поскольку оно прямо влияет на общую прочность и качество напечатанной конструкции. Учитывая отсутствие стандартов, применяют разные методы испытаний и определяют различные размеры образцов для оценки этой важной характеристики [15].

Можно выделить *четыре основных механических методов испытаний* для определения прочности сцепления в бетоне, напечатанном на 3D-принтере:

- Испытание на сдвиг

Самой большой проблемой при испытаниях на сдвиг является предотвращение эксцентриситета, который может привести к возникновению изгибающего момента на контактных поверхностях. Для решения этой проблемы предлагаются модифицированные испытания на сдвиг, как показано на рис. 1.

- Испытание прочности на изгиб

Наиболее распространенной формой испытания на изгиб является испытание на трехточечный изгиб.

- Испытание на прочность при растяжении

При испытании на растяжение два слоя фиксируются механически или химически и отделяются друг от друга с приложением перпендикулярной силы.

- Испытание на прочность при сжатии

Сила сжатия используется перпендикулярно ориентации слоя для разделения двух поверхностей. Одним из важных аспектов является необходимость отказа на контактной поверхности между двумя слоями. Для

этой цели некоторые исследователи [16] вводят отметку, чтобы получить отказ на этом этапе.

Испытания на растяжение, сжатие, изгиб и сдвиг проводятся, как показано на рис.1.

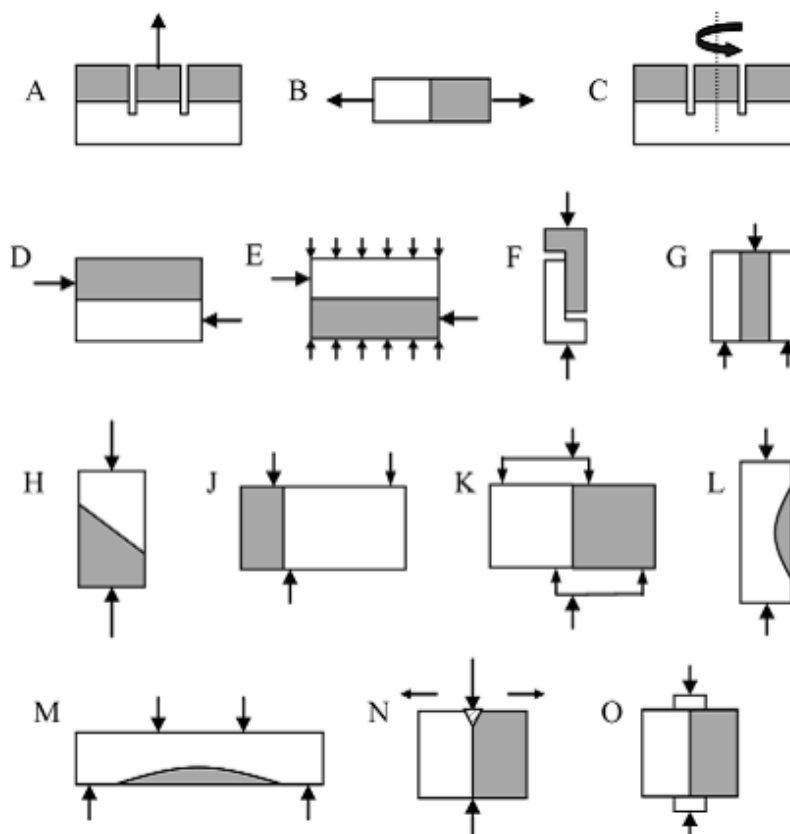


Рис. 1. – а) испытание на отрыв; б) испытание на растяжение; в) кручение; д) испытание на сдвиг; е) модифицированное испытание на сдвиг; ф) модифицированное испытание на сдвиг; г) испытание на срез; h) испытание на косой сдвиг; j) испытание типа гильотина; к) модифицированное испытание на сдвиг; l) испытание на сдвиг и растяжение; m) испытание на сдвиг и растяжение; n) раскалывание; o) испытание на раскалывание призмы [16]

Некоторые авторы [17] для испытания аддитивного бетона напечатанного на 3D-принтере на прочность межслойного соединения в основном проводят на растяжение (прямой и разделенный), в то время как

другие авторы [18-20] использовали комбинацию этих методов испытаний (на сдвиг, сжатие и изгиб (трехточечный изгиб)).

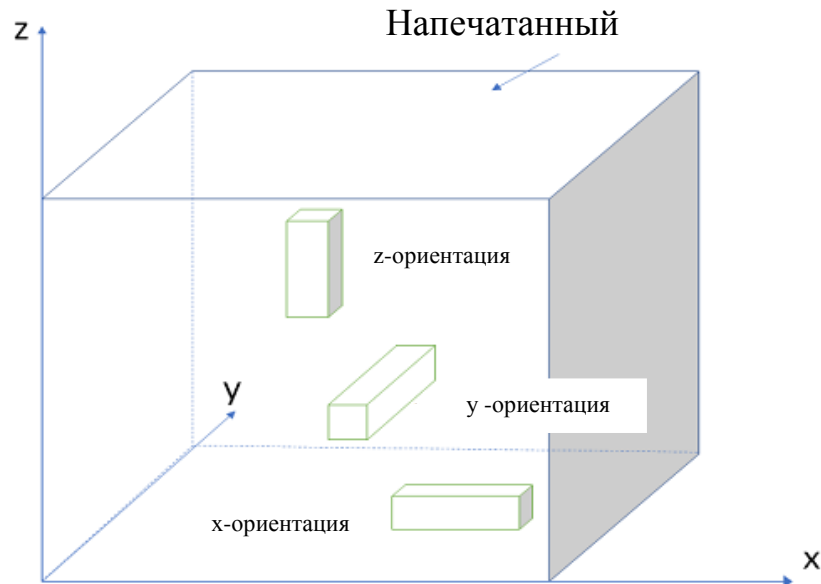


Рис. 2 – Схема ориентации образцов для испытаний на прочность

Форма и номинальные размеры контрольных образцов в зависимости от метода определения прочности бетона должны соответствовать ГОСТ 10180–2012 [3]. Согласно ГОСТ 10180 –2012, допускается применение следующих образцов (таблица1).

Также возможно применение образцов других форм и размеров, если они предусмотрены в действующих нормативных или технических документах.

Образцам необходимо твердеть в нормальных условиях при температуре (20 ± 2) °С с относительной влажностью окружающего воздуха не менее 90 %. Прочность при сжатии изготовленных образцов определяется на 3, 7 и 28 сут. Измерение прочности в ранние сроки позволяет более точно определить марку и класс бетона.

Анализ результатов испытания образцов может осуществляться с применением рентгеновской компьютерной томографии, которая

представляет собой метод трехмерной визуализации, основанный на трехмерной компьютерной реконструкции образца по двумерным рентгенографическим проекциям, полученным под разными углами вокруг его оси вращения.

Таблица №1

Форма и номинальные размеры образцов

Метод	Форма образцов	Номинальные размеры образца, мм
Определение прочности на сжатие и на растяжение при раскалывании	Куб	Длина ребра: 100; 150; 200; 250; 300
	Цилиндр	Диаметр d : 100; 150; 200; 250; 300 Высота $h \geq d$
Определение прочности на осевое растяжение	Призма квадратного сечения	100x100x400; 150x150x600; 200x200x800; 250x250x1000; 300x300x1200
	Цилиндр	Диаметр d : 100; 150; 200; 250; 300 Высота h , равная $2d$
Определение прочности на растяжение при изгибе и при раскалывании	Призма квадратного сечения	100x100x400; 150x150x600; 200x200x800; 250x250x1000; 300x300x1200

Рентгеновская компьютерная томография (Рентген-КТ) — это мощный и неразрушающий инструмент для создания 3D-визуализации внутренней структуры вяжущих материалов. Трехмерные данные могут быть использованы для качественных и количественных исследований.

Вывод

Механические характеристики печатного бетона в значительной степени зависят от ориентации прослоек, особенно сопротивления растяжению при раскалывании. Это обусловлено межслойным

распределением по печатному бетону, типами межслойных соединений и даже количеством слоев. Причина в том, что межслойные соединения являются самыми слабыми соединениями в печатном бетоне, и они сильно влияют на целостность печатного бетона. При применении печатного бетона в качестве несущей конструкции следует уделять больше внимания межслойной ориентации печатного бетонного элемента, так как это является основой безопасного проектирования прочности конструкции.

Литература (References)

1. Yao H., Xie Z., Li Z., Huang C., Yuan Q., Zheng X. The relationship between the rheological behavior and interlayer bonding properties of 3D printing cementitious materials with the addition of attapulgite // *Constr. Build. Mater.* 2022. №316. 125809.
 2. Ji G., Xiao J., Zhi P., Wu Y.C., Han N. Effects of extrusion parameters on properties of 3D printing concrete with coarse aggregates // *Constr. Build. Mater.* 2022. №325. 126740.
 3. Klyuev A.V., Kashapov N.F., Klyuev S.V., Lesovik R.V., Ageeva M.S., Fomina E.V., Ayubov N.A. Development of alkali-activated binders based on technogenic fibrous materials // *Construction Materials and Products*. 2023. №6 (1). P. 60 – 73. URL: doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-1-60-73
 4. Klyuev A.V., Kashapov N.F., Klyuev S.V., Zolotareva S.V., Shchekina N.A., Shorstova E.S., Lesovik R.V., Ayubov N.A. Experimental studies of the processes of structure formation of composite mixtures with technogenic mechanoactivated silica component // *Construction Materials and Products*. 2023. 6 (2). P. 5 – 18. URL: doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-2-5-18
 5. Daungwilailuk T., Pheinsusom P., Pansuk W. Uniaxial load testing of large-scale 3D-printed concrete wall and finite-element model analysis // *Construction and Building Materials*. 2021. №275 (2). P. 122039.
-

6. Kuznetsov D.V., Klyuev S.V., Ryazanov A.N., Sinitsin D.A., Pudovkin A.N., Kobeleva E.V., Nedoseko I.V. Dry mixes on gypsum and mixed bases in the construction of low-rise residential buildings using 3D printing technology // Construction Materials and Products. 2023. №6 (6). 5. URL: DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-6-5

7. Chen Y., Jansen K., Zhang H., Rodriguez C.R., Gan Y., Çopuro ğlu O., Schlangen E. Effect of printing parameters on interlayer bond strength of 3D printed limestone-calcined clay-based cementitious materials: An experimental and numerical study // Constr. Build. Mater. 2020. №262. P. 120094.

8. Huang X., Yang W., Song F., Zou J. Study on the mechanical properties of 3D printing concrete layers and the mechanism of influence of printing parameters // Constr. Build. Mater. 2022. №335. P. 127496.

9. Marchment T., Sanjayan J.G., Nematollahi B., Xia M. Interlayer strength of 3D printed concrete: Influencing factors and method of enhancing // In 3D Concrete Printing Technology; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK. 2019. pp. 241–264.

10. Weng, Y.; Li, M.; Zhang, D.; Tan, M.J.; Qian, S. Investigation of interlayer adhesion of 3D printable cementitious material from the aspect of printing process // Cem. Concr. Res. 2021. №143. P. 106386.

11. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion // Cem. Concr. Res. 2019. №119. pp. 132–140.

12. Nerella V.N., Hempel S., Mechtcherine V. Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing // Constr. Build. Mater. 2019. №205. pp. 586–601.

13. Panda B., Paul S.C., Mohamed N.A.N., Tay Y.W.D., Tan M.J. Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymers mortar // Measurement. 2018. №113. pp. 108–116.



14. Van Der Putten J., De Schutter G., Van Tittelboom K. The effect of print parameters on the (micro) structure of 3D printed cementitious materials // In RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. Springer Zurich, Switzerland. 2018. №19. pp. 234–244.

15. Babafemi A. J., Kolawole M. J., Miah S. C., Paul and B. Panda. A Concise Review on Interlayer Bond Strength in 3D // Sustainability. 2021. №13. P. 7137.

16. Silfwerbrand J., Beushausen H. and Courard L. “Bond” in Bonded Cement-Based Material Overlays for the Repair, the Lining or the Strengthening of Slabs or Pavements // Springer Netherlands. 2011. pp. 51-79.

17. Ma G., Salman N.M., Wang L., Wang F. A. Novel additive mortar leveraging internal curing for enhancing interlayer bonding of cementitious composite for 3D printing // Constr. Build. Mater. 2020. №244. P. 118305.

18. Zareiyan B., Khoshnevis B. Interlayer adhesion and strength of structures in Contour Crafting-Effects of aggregate size, extrusion rate, and layer thickness // Autom. Constr. 2017. №81. pp.112–121.

19. He L., Chow W.T., Li H. Effects of interlayer notch and shear stress on interlayer strength of 3D printed cement paste // Addit. Manuf. 2020. №36. P.101390.

Дата поступления: 17.04.2024

Дата публикации: 24.05.2024