

УДК 69.001.5

Р.В. Кропачов¹, Е.Р. Ахтямова², З.Р. Мухаметзянова³, А.К. Дібіров¹¹ТОВ «Оберон» Казанський національний дослідницький технологічний університет²ТОВ «Оберон» Російський хіміко-технологічний університет ім. Д.І. Менделєєва³ТОВ «Оберон» МБОУ Гімназія №54**ЗАСТОСУВАННЯ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ У БУДІВНИЦТВІ ПРИ 3D-ДРУЦІ**

У роботі проведено аналіз використовуваних матеріалів при 3D друці в будівництві. При цьому в якості нових матеріалів запропоновано використовувати геополімерний бетон, технологія отримання якого заснована на ідеї використання неорганічних мінеральних речовин і, якому характерні більш високі властивості і довговічність у порівнянні зі звичайним бетоном. Також для підвищення теплоізоляційних властивостей побудованих конструкцій, а також для підвищення фізико-механічних властивостей запропоновано використання нових матеріалів при 3D друці – бетону на основі вирізаного очерету, пресованої соломи, конопляних шипів, застосування легкого бетону і легкого бетону на основі пасом конопель.

Ключові слова: 3D друк, бетон, нові матеріали, будівництво, фізико-механічні властивості.

Р.В. Кропачев¹, Э.Р. Ахтямова², З.Р. Мухаметзянова³, А.К. Дибиров¹¹ООО «Оберон» Казанский национальный исследовательский технологический университет²ООО «Оберон» Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева³ООО «Оберон» МБОУ Гимназия №54**ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПРИ 3D-ПЕЧАТИ**

В работе сделан анализ используемых материалов при 3D-печати в строительстве. При этом в качестве нового материала предложено использовать геополлимерный бетон, технология получения которого основана на идее использования неорганических минеральных веществ и для которого характерны лучшие свойства и долговечность по сравнению с обычным бетоном. Для увеличения теплоизоляции построенных конструкций, а также для улучшения физико-механических свойств предложено использование новых материалов при 3D-печати: бетона на основе вырезанного тростника, пресованной соломы, конопляных шипов, применение легкого бетона и легкого бетона на основе прядей конопля.

Ключевые слова: 3D-печать, бетон, новые материалы, строительство, физико-механические свойства.

R.V. Kropachev¹, E.R. Akhtiamova², Z.R. Mukhametzyanova³, A.K. Dibirov¹¹CEO KNRTU²D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia³Trainee 54 School**APPLICATION OF NEW MATERIALS IN CONSTRUCTION IN 3D-PRINTING**

In work the analysis of used materials is carried out at 3D-printing in construction. At the same time, it is proposed to use geopolymer concrete as new materials, the technology of which is based on the idea of using inorganic mineral substances and which is characterized by higher properties and durability in comparison with conventional concrete. Also, to improve the thermal insulation properties of the constructed structures, as well as to improve the physical and mechanical properties, it is proposed to use new materials for 3D-printing - concrete based on carved cane, pressed straw, hemp spikes, lightweight concrete and lightweight concrete based on hemp weaves.

Key words: 3D-printing, concrete, new materials, construction, physical and mechanical properties.

Постановка проблеми. Технологическое продвижение для определенной страны или сообщества напрямую связано с их экономическим ростом, а технология влияет на экономику посредством создания рабочих мест, роста ВВП, появления новых услуг и отраслей, преобразования рабочей силы, инноваций в бизнесе [11]. Адаптация и эффективное использование новых технологий ранее были связаны с трансформацией рынка, улучшением уровня жизни и более надежной международной торговлей, которые позволяют развивать практически все отрасли экономики [11]. Во всех сферах нашей жизни, в том числе и строительстве, можно постоянно искать новые, более современные методы и технологии, которые отвечают принципам устойчивого развития.

С одной стороны, новые подходы должны быть более эффективными, учитывать сохранение истощаемых ресурсов нашей планеты и оказывать минимальное воздействие на окружающую среду, а с другой – обеспечивать более высокое качество конечного продукта. Строительная сфера в этом плане не исключение. Одной из новых перспективных технологий является технология 3D-печати отдельных конструкций и зданий в целом.

Для строительной отрасли характерно потребление невозобновляемых ресурсов и природных материалов в огромных объемах [8, с. 79]. При этом возникают проблемы, связанные с

низкой производительностью труда и аварийными ситуациями на строительных площадках, сложностью контроля строительных процессов, недостатком квалифицированных рабочих [5, с. 32]. Решением данных проблем является применение 3D-печати [16, с. 62].

Бетон – важный материал, используемый в строительных конструкциях различных сооружений, которые могут испытывать ударные нагрузки. Бетон в строительных конструкциях должен противостоять энергии искусственных и природных сил, приводящих к оседанию и растрескиванию, и поглощать ее (Warszawski, 1998). Использование небольшого количества полипропиленовых волокон в бетоне увеличивает сопротивление его растяжению и вязкости.

Механические свойства полипропиленового армированного железобетона (PFRC) достаточно изучены и широко используются в технике. Однако большинство этих исследований ограничивалось только определенными случаями, о которых писали Танг (Tang, 2004), Жак и Сете (Jacques and Cete, 2004), Vonneau et al (1996), Richard и Cheyrezy (1995).

Во всем мире практики-разработчики пытаются решить проблему подбора строительных материалов для 3D-печати. Поэтому для применения строительной 3D-печати необходимо изучить и разработать новейшие материалы, с улучшенными характеристиками и высокой долговечностью.

Применение обычного бетона для 3D-печати в строительстве возможно, но ограничено, поскольку существуют требования к таким материалам [16, с. 293]. При выполнении оптимизационных процессов 3D-печати должна учитываться сила сцепления слоев материала, а сам материал должен достаточно быстро затвердевать и выдерживать вес нанесенных слоев без протекания процессов деформации. Для обеспечения достаточной прочности и крепкого сцепления между осажденными слоями необходимо снижение временного интервала между нанесением слоев, что достигается применением бетона с улучшенными свойствами. Поэтому актуальным является разработка и применение новых материалов в строительстве при 3D-печати.

Формулирование целей статьи. В данной статье предлагается использовать новые материалы в строительстве при 3D-печати.

Анализ последних исследований и публикаций. Одним из способов осаждения в строительстве с применением бетона является экструзия бетона с использованием цифровых технологий. Как отмечено в [1, с. 29], целью 3D-печати в строительстве является масштабирование настольного 3D-принтера до размера строительной площадки. В настоящее время такие методы недостаточно развиты для промышленного применения, но удается создавать стеновые элементы в лабораторных условиях [7, с. 294, 7 – 12].

Тем не менее сама присадочная технология экструзии может быть применена для эффективного и надежного строительства, причем в промышленных масштабах. Для достижения этой цели и оптимизации процесса необходимо преодолеть два основных ограничения [1, 13 – 16]: во-первых, прочность соединения между смежными слоями, которая является слабой стороной печатной структуры. Сила сцепления будет уменьшаться с временным промежутком между нанесенными слоями [6, 7, 14, 15]. Вторым ограничением является процесс затвердевания материала при 3D-печати с течением времени, т.е. материал должен обладать достаточной твердостью чтобы выдерживать вес осаженных слоев. Данное ограничение приводит к увеличению времени всего строительного производства. Также при выборе состава бетонной смеси учитываются четыре основных параметра: экструдированность, удобоукладываемость, способность к сборке (buildability) и время действия (opentime).

В настоящее время для 3D-печати в строительстве используется широкий спектр компонентов: суперпластификаторы, ускорители, замедлители, минеральные добавки и другие материалы. Для повышения прочности бетона используются различные полимеры и резины, порошки сталей, сплавов титана, никеля, алюминия, меди, а также инструментальные и конструкционные керамики, биосовместимые и нанопропрочненные композиты.

Китайская компания Winsun, занимающая одну из лидирующих позиций в области 3D-печати, успешно применяет стойкий к истиранию состав Crazy Magic Stone [1, 4, 10, 12, 17]. Высокие механические характеристики обусловлены наличием обработанного кварцевого песка и специальной фибры. Winsun также широко использует гипс с добавлением стекловолокна (Glass Fiber Reinforced Gypsum). GFRG содержит 3-25% фибры длиной от 1 до 13 см и диаметром от 5,8 до 100 мкм. Водогипсовое соотношение находится в пределах от 0,25 до 0,60 [1, 4, 10, 12, 17]. Стекловолокно повышает сопротивление состава бетона к трещинообразованию, делает его более пластичным и удобоукладываемым. В композитах с использованием стекловолокна растягивающие напряжения воспринимает на себя фибра, что существенно повышает

сопротивление такого материала растяжению и изгибу.

Изучив свойства армированного полипропиленовым волокном бетона, Karahan и Atis (2011) обнаружили, что добавление объемной доли 0,05 и 0,10% волокна слегка увеличивало или поддерживало прочность бетона, соответственно. При этом, когда добавлялось 0,20% полипропиленового волокна, прочность бетона снижалась.

В работах [4, 9, 10, 12] динамические свойства армированного полипропиленовым волокном бетона были экспериментально исследованы с использованием метода SHPB. Сущность метода приведена в [4, 9, 10, 12]. В исследовании были использованы четыре типа цементных материалов: портландцемент (ПЦ), микрокремнезем (SF), ультратонкая зола (UFFA) и ультратонкий шлак (UFSL). Естественный речной песок с максимальным размером 3 мм использовался для замены ультратонкого кварцевого песка [4, 9, 10, 12]. Также был использован суперпластификатор с коэффициентом уменьшения воды 30%, производимый компанией Jingwei в Гуанчжоу. Стальные волокна были произведены компанией Guo Mao Steelfiber Company, КНР. Образцы представляли собой круглые цилиндры диаметром 40 мм с одинаковой длиной 20 мм. Скорость деформации достигала от 30 до 100 с⁻¹. Результаты показали, что для всех исследуемых видов бетона при различном давлении в камере повышается прочность. Это связано с увеличением доли трещин в бетоне и относительным удлинением с ростом давления, что указывает на более равномерное распределение трещин при меньшем давлении.

Изложение основного материала. На основе анализа публикаций и исследований предлагается применение новых материалов в строительстве при 3D-печати.

При строительстве здания любым известным в настоящее время способом необходимо обеспечить энергоэффективность строительных оболочек, а также всего здания. Альтернативная конструкция стены здания, созданная 3D-печатью, заставляет искать новые методы энергоэффективности.

В качестве новых материалов может быть использован геополлимерный бетон, технология получения которого основана на идее использования неорганических минеральных веществ [2]. Геополлимерный бетон является экологически чистым, а главное его преимущество – простота изготовления. Этот бетон высокоустойчив к коррозии, обладает высокими теплоизоляционными свойствами и быстро застывает. Кроме того, он имеет повышенную степень сцепки с различными поверхностями.

Строительный геополлимерный бетон для 3D-печати обладает улучшенными свойствами и долговечностью. Вследствие его повышенной тиксотропности и текучести появляется возможность регулировать сроки его схватывания при 3D-печати с обеспечением высокой прочности.

Также можно улучшить теплоизоляционные свойства строительных объектов, созданных с помощью 3D-печати, путем укладки энергоэффективной теплоизоляции в пустые стеновые конструкции (рис. 1) [9]. Для этого возможно применение пенополистирола, пенополиуретана, каменной ваты и других теплоизоляционных материалов. Также было предложено применение бетона на основе вырезанного тростника, прессованной соломы, конопляных шипов, использование легкого бетона и легкого бетона на основе прядей конопли. Данные материалы обладают следующими основными свойствами (табл. 1) [13].



Рис. 1. Построение полого строения при 3D-печати: а – армированные волокном, б – усиленные перегородками

Характеристики теплоизоляционных бетонов для 3D-печати

Материал	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Вырезанный тростник	400	0,12
	300	0,09
	260	0,078
	220	0,06
Прессованная солома	150 – 250	0,09
	90 – 110	0,045
	73 – 85	0,04 – 0,05
	100	0,054 – 0,065
Конопляные шипы	70 – 90	0,048 – 0,06
Легкий бетон	1000	0,13
	900	0,114
	580	0,073
	420	0,071
Легкий бетон на основе прядей конопли	260	0,075
	360	0,079
	400	0,084

Предложенные материалы позволяют в ближайшем будущем перейти от теории к практике, повысить возможности технологии строительной 3D-печати и сделать процесс строительства быстрым, и эффективным. Эти материалы позволяют улучшить теплоизоляционные свойства построенных конструкций, а также их физико-механические показатели и долговечность.

Процессы 3D-печати различными растворами в основном отличаются толщиной печатного слоя и общей высотой продукта. Толщину экструдированного слоя формирует экструдер с различным размером сопла. Во время печати можно настроить геометрию экструдированного слоя, изменить скорость печати для получения высококачественных строительных продуктов.

Для повышения эффективности печати можно также предложить использовать печатающую головку с несколькими соплами, установленными на разных уровнях один за другим (рис. 2). Принимая во внимание свойства уложенной смеси, расстоянием между экструдерами 1, 3 и 4 можно регулировать расширение возможностей технологии печати и прочности строительных конструкций.

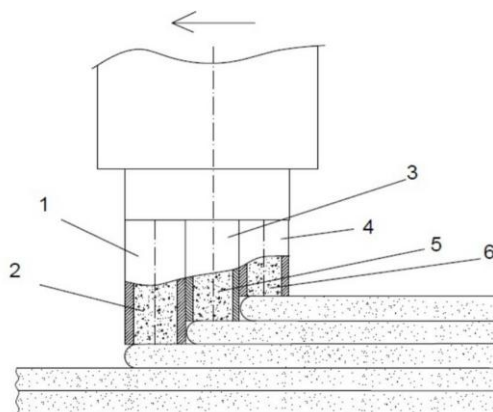


Рис. 2. Печатающая головка с несколькими экструдерами: 1, 3, 4 – экструдеры; 2, 5, 6 – полость с бетоном

Кроме того, можно привести пример принтера с двумя-тремя соплами от Contour Crafting, который делает многослойные стены в один проход. Техника 3D-печати, используемая Contour Crafting, может построить дом диаметром 14,6 м и высотой 3,7 м за менее чем 14 часов. Таким образом увеличивается скорость и эффективность строительства.

Выводы. В работе проведен анализ используемых материалов при 3D-печати в строительстве. В качестве новых материалов предложено использовать геополлимерный бетон, технология получения которого основана на идее использования неорганических минеральных веществ. Для него характерны улучшенные свойства и долговечность по сравнению с обычным бетоном. Для улучшения теплоизоляционных свойств построенных конструкций, а также их физико-механических показателей предложено использование новых материалов при 3D-печати: бетона на основе вырезанного тростника, пресованной соломы, конопляных шипов, а также применение легкого бетона и легкого бетона на основе прядей конопли.

Список использованной литературы

1. 3D-печать в строительстве / [Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С. и др.] // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2017. – № 1. – С. 27–46.
2. Геоцемент. Высокотехнологичный материал нового поколения [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <http://apis-cor.com/about/blog/geocement-new-generation-hightech-material>.
3. Bederina M. Effect of limestone fillers the physic-mechanical properties of limestone concrete / Bederina M, Makhloufi Z, Bouziani T. // *Physics Procedia*. – 2011. – №21. – С. 28–34.
4. Contruktion. Mega Scale 3D Printing [Электронный ресурс] / [Alwi A., Karayiannis S., Starkey B. та ін.]. – Group 1. Final Report, 11th January 2013. Faculty of Engineering and Physical Sciences University of Surrey. 2012. – Режим доступа до ресурсу: <http://personal.ee.surrey.ac.uk/Personal/R.Webb/MDDP/2012/Report/3D%20Building%20Printer%20%20Group%201.pdf>.
5. Di Carlo T. Experimental And Numerical Techniques To Characterize Structural Properties Of Fresh Concrete / Di Carlo T., Khoshnevis B., Carlson A. // ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineer. – 2013. – С. V009T10A062-V009T10A062.
6. Grugel R. N. Sulfur “concrete” for lunar applications–Sublimation concerns / Grugel R.N., Toutanji H. // *Advances in Space Research*. – 2008. – Т. 41. – No. 1. – P. 103 – 112.
7. Hager I. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? / I. Hager, A. Golonka, R. Putanowicz // *Procedia Engineering*. – 2016. – No. 151. – P. 292–299.
8. Ibrahim M. I. M. Estimating the sustainability returns of recycling construction waste from building projects / Ibrahim M. I. M. // *Sustainable Cities and Society*. – 2016. – No. 23. – С. 78–93.
9. Joop de Boer. Which Architect Is Winning The 3D Printing Rat Race? [Электронный ресурс] / Joop de Boer // *Pop-Up City*. – 2014. – 1 July. – Режим доступа до ресурсу: <http://popupcity.net/which-architect-is-winning-the-3d-printing-rat-race/>.
10. Khoshnevis B. Automated Construction by Contour Crafting-Related Robotics and Information Technologies [Электронный ресурс] / Khoshnevis B. // *Automation in Construction*. – 2004. – Vol. 13, iss. 1. – PP. 5–19. – Режим доступа: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580503000736>.
11. Kvochko E. “Fiveways technology can help economies” [Электронный ресурс] / Kvochko E. // *World Economic Forum*, 11 April 2013. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.weforum.org/agenda/2013/04/five-ways-technology-can-help-the-economy/> (20 March 2017).
12. Lipson H. *Fabricated. The New World of 3D Printing* / H. Lipson, M. Kurman. – Indiana : Wiley, 2013. – 320 p.
13. Options of sustainable development of region’s territory / Savytskyi M.V., Bondarenko O.I., Babenko M.M. and Benderskyi Yu.V. // *Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ. – 2015. – № 4. – С. 157–161.*
14. Perrot A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques / Perrot A., Rangedard D., Pierre A. // *Materials and Structures*. – 2016. – Т. 49. – No. 4. – P. 1213–1220.
15. Wallevik J. E. Rheological properties of cement paste: thixotropic behavior and structural breakdown / Wallevik J. E. // *Cement and Concrete Research*. – 2009. – Т. 39. – No. 1. – С. 14–29.
16. Warszawski A. Implementation of robotics in building: Current status and future prospects / Warszawski A., Navon R. // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 1998. – No. 124. – P. 31–41.
17. Zhang J. Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting / Zhang J., Khoshnevis B. // *Automation in Construction*. – 2013. – No. 29. – С. 50–67.