УДК 691.5 DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-4-122-134

О.В. ДЕМЬЯНЕНКО, Н.О. КОПАНИЦА, Е.А. СОРОКИНА,
Томский государственный архитектурно-строительный университет

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ТЕРМОМОДИФИЦИРОВАННОГО ТОРФА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

Представлены результаты исследований по разработке научно обоснованных составов строительных смесей с улучшенными эксплуатационными характеристиками для 3D-печати. Для регулирования физико-механических и технологических свойств смесей на основе цемента применена ранее разработанная авторами добавка на основе термомодифицированного торфа – МТ-600. В работе проведен обзор мирового опыта в области применения аддитивных технологий в строительстве. Представлены результаты экспериментальных исследований цементного камня и строительной смеси с использованием модифицирующей добавки МТ-600 (термомодифицированный торф) для технологии 3D-печати. Установлено, что при использовании предложенных тонкодисперсных добавок увеличивается прочность цементного камня на ранних сроках твердения, что является определяющим фактором при формировании строительно-технических характеристик для технологии 3D-печати. С помощью рентгенофазового анализа определен состав новообразований модифицированного цементного камня с добавкой МТ-600, что позволило объяснить особенности формирования структуры и свойств строительных смесей в процессе твердения.

Ключевые слова: аддитивные технологии; МТ-600; торф; строительные смеси.

Для цитирования: Демьяненко О.В., Копаница Н.О., Сорокина Е.А. Влияние добавки термомодифицированного торфа на технологические свойства строительных смесей для 3D-печати // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 4. С. 122–134.

O.V. DEM'YANENKO, N.O. KOPANITSA, E.A. SOROKINA,
Tomsk State University of Architecture and Building

PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF 3D PRINTING CONSTRUCTION MIXES DEPENDING ON THERMALLY-MODIFIED PEAT ADDITIVE

The paper presents the research results on the development of scientifically valid compositions of 3D printing construction mixes with improved performance characteristics. To regulate the physical, mechanical and technological properties of cement-based mixes, thermally-modified peat additive MT-600 is developed. The paper studies the world experience in the construction additive technology field. The experimental results are presented for cement paste and construction mixes with MT-600 additive for 3D printing. It is established that using the proposed fine additive increases the strength of the cement paste at early stages of hardening, which is the determining factor in the formation of building and technical characteristics for 3D printing. The X-ray phase analysis is carried out for the new composition of cement paste modified with MT-600 additive, which allows studying characteristics of the structure and properties of construction mixes during the hardening process.

Keywords: additive technologies; MT-600 peat additive; construction mixes.

For citation: Dem'yanenko O.V., Kopanitsa N.O., Sorokina E.A. Vliyanie dobavki termomodifitsirovannogo torfa na tekhnologicheskie svoistva stroitel"nykh smesei dlya 3D-pechati [Performance characteristics of 3D printing construction mixes depending on thermally-modified peat additive]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2018. V. 20. No. 4. Pp. 122–134. (rus)

Введение

Развитие наукоемких отраслей и высоких технологий является основой технологической безопасности и независимости страны. Успешно развивающимся новым мировым трендом во многих областях являются аддитивные технологии. Обоснованно считается, что они вместе с другими прорывными разработками составят ядро шестого технологического уклада, определят будущее науки и промышленности [1–3].

Аддитивные технологии (AM – Additive Manufacturing, AF – Additive Fabrication) представляют собой технологии послойного создания (наращивания) изделий по цифровой 3D-модели. AM-технологии в плане ресурсосбережения представляют собой идеальное решение, т. к. потери используемых материалов практически равны нулю [4–6].

Технология строительной печати активно развивается в таких странах, как Китай, США, Филиппины, Великобритания. В современном строительном комплексе все больший интерес проявляется к аддитивным технологиям, применение которых может привести к увеличению скорости строительства, уменьшению трудозатрат, ресурсо- и энергосбережению. Аддитивные технологии в строительном производстве позволяют изготавливать послойно на основе компьютерной 3D-печати конструкции и изделия любой конфигурации и сложности. С помощью строительной 3D-печати с меньшими трудозатратами и экономично можно воспроизводить новые объекты и малые архитектурные элементы нестандартной формы [7–15]. Для печати объектов применяются различные виды материалов с заданными свойствами в зависимости от назначения изделий и способа 3D-печати.

Наиболее изученным и распространённым материалом для 3D-печати на сегодняшний день являются пластмассы, керамические массы, гипс, но для строительства зданий и сооружений эти материалы имеют ограниченное применение, прежде всего, из-за невозможности обеспечить все требуемые для изделий и конструкций эксплуатационные характеристики. Технология печати строительными смесями на основе цемента, так называемая контурная технология печати, сравнительно молода и мало изучена. Поэтому исследования в области создания цементных бетонных и растворных смесей для 3D-печати являются актуальными

Важной задачей для реализации возможностей 3D-печати является подбор составов композиционных строительных материалов, отвечающих необходимым эксплуатационным характеристикам возводимого здания и удовлетворяющих требованиям технологии экструзионной печати. Чаще всего с этой целью используют мелкозернистые бетонные смеси, обладающие необходимой прочностью, жесткостью, морозостойкостью, повышенными адгезионными и когезионными свойствами и скоростью твердения. В настоящее время рекомендации по подбору составов строительных смесей, обладающих необходимым набором свойств, отсутствуют. При проектировании составов композиционных материалов необходимо учитывать также особенности 3D-принтера. Например, необходимость подачи формовочной смеси на большую высоту, но при этом должны быть сохранены ее реологические свойства и однородность структуры в процессе транспортирования и укладки, жизнеспособность смеси. Для обеспечения нанесения на шероховатую поверхность тонким и ровным слоем бетонной смеси, позволяющим обеспечить плотное прилегание к предыдущему слою и адгезию между слоями, необходимы особые требования и к показателю пластической прочности бетонной смеси [14, 15]. Для оптимизации процесса трехмерной печати должны быть учтены два условия. Во-первых, сила сцепления между слоями уменьшается с увеличением временного промежутка между укладкой последующих слоев [15]. Во-вторых, строительная смесь должна набрать достаточную начальную прочность, чтобы выдержать следующий укладываемый слой, не деформируясь. Требование к обеспечению начальной прочности ранее напечатанных слоев может замедлить возведение конструкций. Сопоставление этих двух ограничений приводит к парадоксу при оптимизации скорости печати. Временной интервал между двумя осажденными слоями должен быть таким, чтобы обеспечить необходимую прочность на сжатие формовочной смеси и сцепление между укладываемыми слоями в ранние сроки твердения, согласованно с ритмом движения экструдера 3D-принтера [16].

Для обеспечения деформативных свойств конструкций зданий применяется армирование. В то же время вопрос об оптимальном способе армирования с применением 3D-печати остается открытым. Применение классических металлических каркасов вызывает определенные трудности, поэтому перспективным является более широкое использование фиброармирования. Армирующим волокном может быть базальт, стекловолокно, полипропилен и другие волокна. Для снижения теплопроводности бетона требуется введение специальных наполнителей (гранулированный пенополистирол, керамзит, вермикулит, зольные микросферы и т. п.). Также теплоизоляция сооружения обеспечивается печатью трёхслойной конструкции стен с введением в пустоты сыпучего теплоизоляционного материала [1–10]. Технические требования к строительным смесям для 3D-печати представлены в табл. 1. Характеристики, приведенные в таблице, могут меняться в зависимости от вида печатаемой конструкции и типа оборудования для печати.

Таблица 1

Технические требования к строительным смесям для 3D-печати

№ п/п	Требование	Функциональное назначение	Показатель
1	Растворная смесь		
1.1	Водоудерживающая способность, %	Предотвращение потери влаги при транспортировке и перемешивании смеси	Не менее 97
1.2	Расслаиваемость, %	Обеспечение однородности при приготовлении, транспортировке по трубам и экструзии	Не более 10
1.3	Вязкость, Па·с.	Обеспечение возможности транспортировки по трубам и стабильного дозирования смеси	10^9–10^{12}
1.4	Пластическая прочность, Па	Обеспечение заданной геометрии смеси при экструзии (формование строительной смеси, отсутствие обрывов в процессе укладки)	Не менее 80
1.5	Скорость схватывания смеси, мин	Обеспечение прочности нижнего слоя перед укладкой последующего слоя	Не более 20 после экструзии
1.6	Подвижность смеси, мм	Обеспечение стабильной геометрии после экструзии	Не более 77
2	Свойства затвердевшей смеси		
2.1	Прочность при сжатии	Обеспечение прочностных свойств конструкций	Не менее В22,5
2.2	Средняя плотность, кг/м^3	Обеспечение заданного веса и прочности конструкций	600–2000
2.3	Адгезия, МПа	Обеспечение сцепления между слоями смеси для прочности и однородности конструкции	Не менее 2
2.4	Теплопроводность, Вт/ (м·К)	Теплоизоляция элементов зданий	Не более 0,7
2.5	Морозостойкость, циклы	Обеспечение долговечности конструкций и стойкости к сезонным перепадам температур	Не менее 100

Технология производства изделий с помощью 3D-печати предполагает следующие этапы. На первом этапе производится подготовка компонентов строительной смеси, их дозирование в соответствии с рецептурой. На втором этапе осуществляется приготовление формовочной смеси. Формовочные смеси приготавливают в бетоносмесителях вихревых или принудительного действия. Время от начала приготовления смеси до ее укладки не должно превышать одного часа (жизнеспособность смеси). Третий этап включает в себя изготовление изделий. Формование изделий осуществляется путем экструзии строительной смеси из головки строительного 3D-принтера. Опалубка при этом не используется, что и отличает технологию 3D-печати от традиционных технологий формования изделий (рис. 1). Сформованные изделия выдерживают до конца схватывания смеси и оставляют для набора прочности, необходимой для транспортировки изделий. Готовые изделия извлекают из 3D-принтера, маркируют и отправляют на склад готовой продукции [17].

Рис. 1. 3D-печать изделия из бетона на лабораторном 3D-принтере

Исследовательская часть

Для обеспечения требуемых характеристик строительных смесей для 3D-печати важным является подбор состава смеси с обоснованием применения комплекса модифицирующих добавок различного назначения. Большинство применяемых в технологии производства строительных смесей добавок являются импортными и приводят к существенному удорожанию продукции. Производство импортозамещающих конкурентоспособных по свойствам добавок в строительные смеси является актуальной задачей. Одним из способов решения данной проблемы является организация производства модифицирующих добавок на основе местного сырья. Сырьевая база Сибирского региона позволяет создавать модифицирующие добавки на основе торфа для регулирования свойств строительных смесей [18, 22, 24, 25]. Запасы этого частично возобновляемого ресурса в Томской области составляют 29,3 млрд т в расчете на 40% влажность. По этому показателю Томская область занимает второе место в России, уступая лишь Тюменской. Вещественный состав торфа представлен разнообразными органическими и минеральными соединениями. Наличие в нем химически активных органоминеральных функциональных групп обеспечивает возможность применения различных способов модифицирования сырья: термического, химического, механического или сочетания нескольких видов воздействия и получения продуктов различного назначения, в том числе и эффективных добавок для строительных смесей [18, 22, 27]. В работах [18, 22–29] приведены результаты исследований по изучению режимов получения модифицирующих добавок на основе торфа, изучению их свойств и возможности применения для регулирования строительно-технических характеристик строительных смесей различного назначения. Для проведения исследований в лабораторных условиях методом термоактивации торфа без доступа воздуха при температуре 600 °С и измельчения в планетарной мельнице готовилась модифицирующая добавка МТ-600. Вещественный состав термомодифицированного торфа представлен преимущественно кремнием, алюминием, углеродом и кальцием (табл. 2) [22]. Показано, что полученная таким способом добавка содержит в том числе и наноразмерные элементы в виде различных форм наноуглерода, таких как фуллерены, размером от 5 нм, нанотрубки и нановолокна, размеры которых достигают 200 и более нанометров при поперечном размере 20 и менее нанометров, удельная поверхность полученной добавки составила 0,6 м^2/г [18, 22, 26, 27].

Таблица 2

Результаты исследования вещественного и зернового состава модифицирующей добавки МТ-600

Фаза	Размеры, мкм	Содержание, %
SiO_2	> 400	43,81
$CaCO_3$	180	47,99
C (графит)	15	7,77
$CaAl_2Si_2O_8$	100	0,31
C60	10–20	0,12

В работе были использованы: портландцемент класса ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108–2016, песок по ГОСТ 8736–2014. Для исследования свойств цементно-песчаных растворов, модифицированных МТ-600 различного зернового состава, – вода затворения по ГОСТ 23732–2011. Из приготовленного в лабораторных условиях цементно-песчаного раствора с добавками готовились образцы – кубики с размерами 70,7×70,7×70,7 мм из твердеющих в воздушно-влажных условиях. Прочностные характеристики затвердевшего раствора определялись по ГОСТ 30744–2001, реологические характеристики растворных смесей по ГОСТ 31356–2007.

В работах [18, 22–29] представлены результаты исследований по определению рационального содержания добавки МТ-600 в цементном камне. Показано, что модифицирующей добавки должно быть 0,5 % от массы цемента, при этом прочность цементного камня увеличивается до 40 % [18]. Для оценки влияния фракционного состава на свойства цементного камня полученную после измельчения добавку МТ-600 рассеивали на фракции: 0,125–0,18 мм; 0,08–0,125 мм; менее 0,08 мм. Для сравнения готовились контрольные образцы цементного камня с нефракционированной добавкой МТ-600 и модифицированные различными фракциями. Полученные добавки в соотношении 0,5 % от массы цемента смешивались с цементом в сухом состоянии, далее затворялись водой. Прочность на сжатие модифицированных образцов оценивалась в 3, 7, 28 сут твердения. Результаты испытаний представлены в табл. 3.

Таблица 3

Прочностные показатели образцов

Серия образцов	МТ-600, % от Ц	В/Ц	Прочность при сжатии, МПа		
			3 сут	7 сут	28 сут
1	–	0,258	40,2	50,8	57,65
2	0,5	0,25	49,6 (+23 %)	65,3 (+20 %)	71,9 (+24 %)
3	**0,5**	**0,258**	**60 (+49 %)**	**63,5 (+25 %)**	**78,4 (+35 %)**
4	0,5	0,26	56,7 (+41 %)	75,5 (+49 %)	76,9 (+33 %)
5	**0,5**	**0,268**	**58,56 (+45 %)**	**76 (+50 %)**	**77,3 (+34 %)**

Примечание. Серии: 1 – контрольный (Цемент + Вода); 2 – Цемент + МТ-600 (фракция менее 0,08 мм); 3 – Цемент + МТ-600 (фракция 0,08–0,125 мм); 4 – Цемент + МТ-600 (фракция 0,125–0,180 мм); 5 – Цемент + МТ-600 (нефракционированный состав).

Полученные результаты показали, что у образцов, модифицированных добавкой МТ-600 нефракционированного состава, прочность цементного камня повышается к 28 сут твердения на 34 %, а с фракцией 0,08–0,125 мм – на 35 %, по сравнению с контрольными образцами. Необходимо отметить, что в ранние сроки твердения (3 сут) прочность цементного камня с добавкой МТ-600 фракции 0,08–0,125 мм на 49 % выше, чем у контрольных. Коэффициент вариации прочности на сжатие составлял не более 4,6 %. Набор прочности в ранние сроки твердения является важным критерием при разработке составов смесей для строительной 3D-печати. Поэтому применение добавки фракционированной МТ-600 в строительные смеси является целесообразным. Упрочнение цементного камня при введении торфяных добавок можно объяснить формированием более плотной пространственно-организованной иерархической структуры за счет направленного изменения адсорбционных, гидратационных процессов, а также кинетики зародышеобразования [19, 20]. При этом происходит замедление развития микротрещин в материале, связанное с эффектом микроармирования цементного камня и перераспределения в нем напряжений [21]. Важной характеристикой для строительных смесей, применительно к аддитивным технологиям, является их водоудерживающая способность и подвижность. На рис. 2, 3 приведены результаты определения этих показателей для растворных смесей с модифицирующей добавкой МТ-600 разного фракционного состава.

Приведенные результаты показывают, что применение разделенной на фракции добавки МТ-600 способствует повышению подвижности смеси от 1 до 6 %, максимальный эффект достигается с фракцией 0,08–0,125 мм, а водоудерживающие свойства хоть и незначительно (0,3 %), но снижаются, что связано с гидрофобностью добавки на основе торфа. Таким образом, применение добавки МТ-600 фракции 0,08–0,125 мм не только обеспечивает повышение прочности как в ранние (3 сут), так и в поздние (28 сут) сроки твердения строительного раствора, но и обладает пластифицирующим эффектом.

В соответствии с технологическими требованиями для 3D-печати для повышения водоудерживающей способности бетонных смесей будет разработан и использован комплекс добавок, включающий полимерные компоненты.

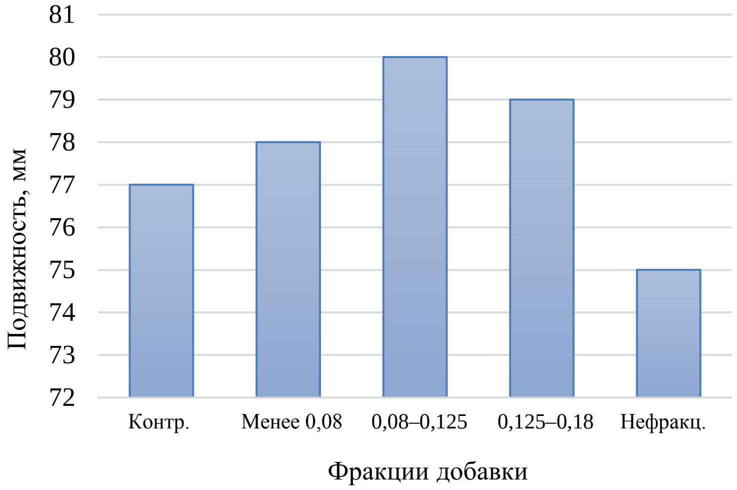

Рис. 2. Влияние добавки МТ-600 на подвижность смеси

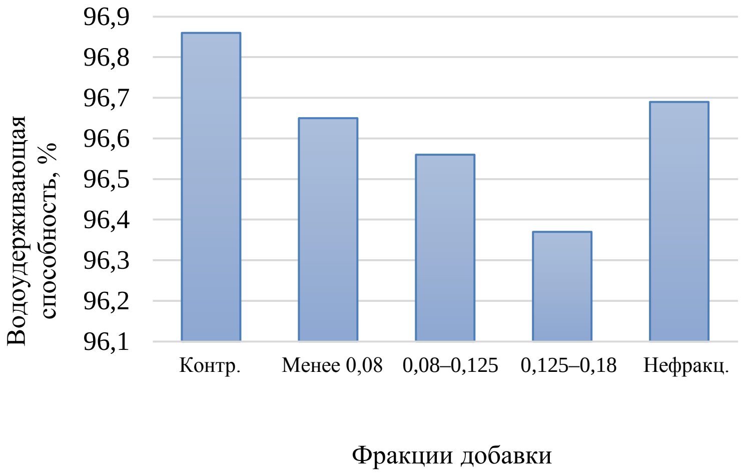

Рис. 3. Влияние добавки МТ-600 на водоудердживающую способность смеси

Для определения состава новообразований в модифицированном цементном камне и объяснения особенностей формирования структуры и состава цементного камня с добавкой МТ-600 был проведен рентгенофазовый анализ. Дифрактограммы снимались на дифрактометре XRD-6000 на CuKα-излучении (рис. 4). Результаты анализа фазового состава цементного камня, проведенного с использованием баз данных PCPDFWIN и PDF-4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDERCELL 2.5, представлены на рис. 4, 5.

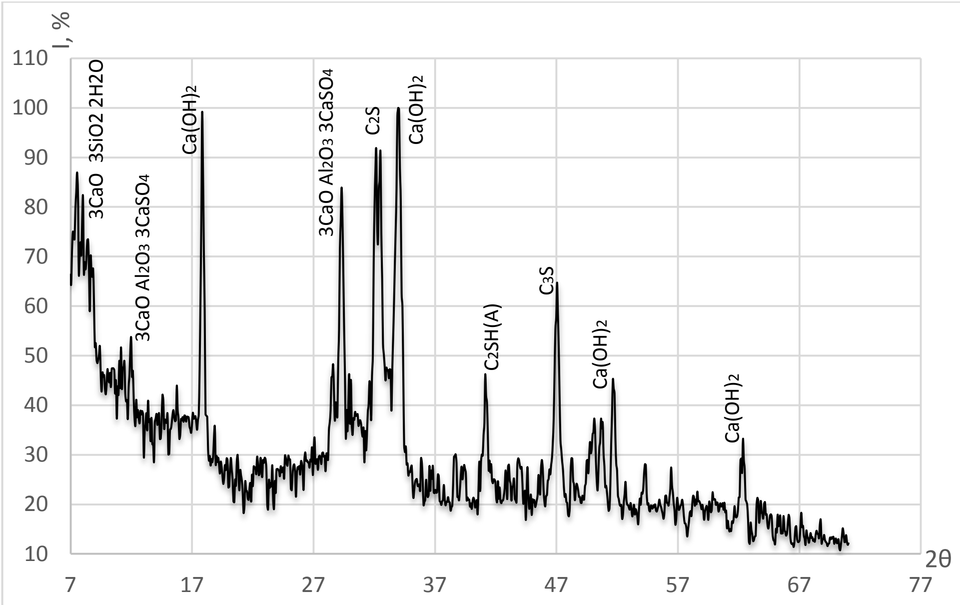

Рис. 4. Дифрактограмма цементного камня на 28 сут твердения: контрольный образец

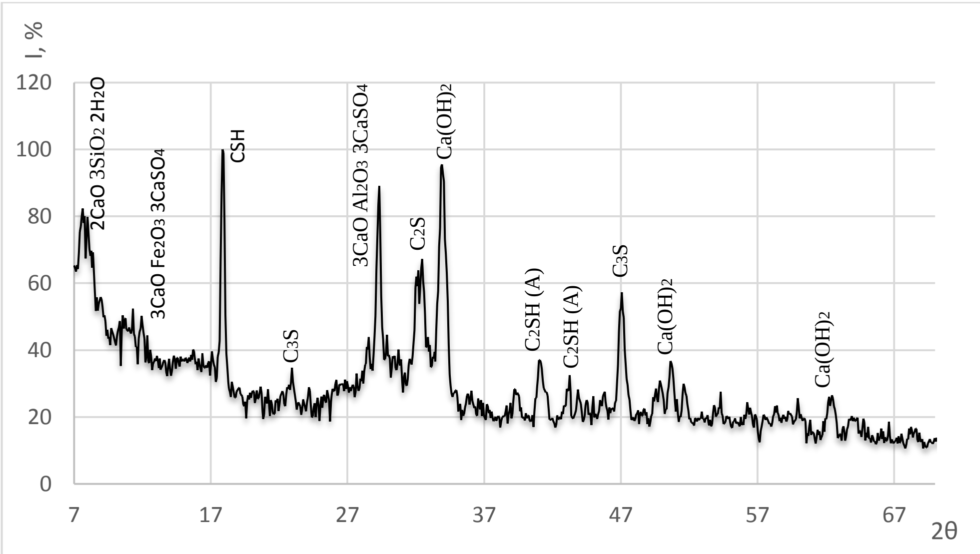

Рис. 5. Дифрактограмма цементного камня на 28 сут твердения: Ц + МТ-600

Рентгенофазовый анализ продуктов гидратации контрольного образца и модифицированного добавкой МТ-600 подтверждает образование новых кристаллических фаз в модифицированном цементном камне. С введением добавок на основе термически обработанного торфа в гидратированном цементе появляются дополнительные пики стабильных гидросиликатов кальция типа C_2SH (d/n = 7,40; 3,04 Å), низкоосновных гидросиликатов кальция типа C-S-H (d/n = 11, 4,94; 2,92; 2,19; 2,09 Å) и наблюдается снижение интенсивности пиков кристаллических фаз портландита Ca (OH) 2 (d/n = 4,9; 2,63; 1,68; 1,48 Å), этим и обусловлено повышение прочности цементного камня.

Результаты исследования влияния фракционного состава МТ-600 показали эффективность используемых добавок, как обеспечивающих повышение прочности в ранние сроки твердения, так и имеющих пластифицирующий эффект.

Таким образом, для решения вопросов, связанных с разработкой составов строительных смесей для 3D-печати в строительстве, необходимо учитывать многофакторность эксплуатационных и технологических требований к композиционным материалам как в процессе формования, так и эксплуатации строительных изделий. Согласованное достижение основных характеристик возможно с учетом эффективного применения в составе строительных смесей полифункциональных модифицирующих добавок. Дальнейшие исследования, направленные на изучение влияния торфяных добавок на свойства строительных смесей для 3D-печати, актуальны, т. к. их применение ведет к снижению стоимости путем сокращения количества импортных модификаторов в составе смесей, а применение 3D-печати в строительстве в перспективе может открыть широкие возможности в развитии строительных технологий, с которыми традиционное производство не может конкурировать.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Warszawski A., Navon R.* Implementation of robotics in building: Current status and future prospects // Journal of construction Engineering and Management. 1998. № 124 (1). P. 31–41.
2. *Ibrahim M.I.* Estimating the sustainability returns of recycling construction waste from building projects // Sustainable Cities and Society. 2016. № 23. P. 78–93.
3. *Chen L. et al.* The research status and development trend of additive manufacturing technology // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. P. 1–10.
4. *Вальтер А.В.* Послойный синтез армированных объемных изделий // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. Т. 2. № 12. С. 222–229.
5. *Каблов Е.Н.* Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 7–17.
6. *Gálvez J.A.* Not Just a Pretty Face: Three-Dimensional Printed Custom Airway Management Devices // 3D Printing and Additive Manufacturing. 2016. Т. 3. № 3. P. 160–165.
7. *Barazanchi A.* Additive Technology: Update on Current Materials and Applications in Dentistry // Journal of Prosthodontics. 2016.
8. *Kumar L.J.* Nair Current Trends of Additive Manufacturing in the Aerospace Industry // Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies. Springer Singapore. 2016. P. 39–54.
9. *Kreiger M.A., MacAllister B.A., Wilhoit J.M.* Case The current state of 3D printing for use in construction // The Proceedings of the 2015 Conference on Autonomous and Robotic Construction of Infrastructure. Ames. Iowa. 2015. P. 149–158.
10. *Huang S.H., Liu P., Mokasdar A., Hou L.* Additive manufacturing and its societal impact: a literature review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. Т. 67. № 5–8. P. 1191–1203.
11. *Удодов С.А., Белов Ф.А., Золотухина А.Е.* 3D-печать в строительстве: новое направление в технологии бетона и сухих строительных смесей // Сб. статей победителей VI Международной научно-практической конференции / под общ. ред. Г.Ю. Гуляева. М.: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2017.

12. *Литовкин С.В., Петькова Ю.Р.* Использование 3D-печати в машиностроении и строительстве // Актуальные проблемы современного машиностроения: Международная научно-практическая конференция. Югра: ФГА ОУ «НИ ТПУ», 2015. С. 433–435.
13. *Грахов В.П., Мохначев С.А., Бороздов О.В*. Влияние развития 3D-технологий на экономику строительства // Фундаментальные исследования. 2014. № 11–12. С. 2673–2676.
14. *Hager I., Golonka A., Putanowicz R*. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? // Procedia Engineering. 2016. № 151. P. 292–299.
15. *Lloret E., et al.* Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication // Computer-Aided Design. 2015. № 60. P. 40–49.
16. *Le T.T., et al.* Hardened properties of high-performance printing concrete // Cement and Concrete Research. 2012. Т. 42. P. 558–566.
17. *Баженов Ю.М.* Технология бетона. М.: Изд-во АСВ, 2002. 500 с.
18. *Саркисов Ю.С., Копаница Н.О.* О некоторых аспектах применения наноматериалов и нанотехнологий в строительстве // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 4. С. 226–234.
19. *Королев Е.В., Баженов Ю.М., Береговой В.А.* Модифицирование строительных материалов наноуглеродными трубками и фуллеренами // Строительные материалы: наука. 2006. № 8. С. 2–4.
20. *Гувалов А.А.* Влияние органоминеральной добавки на раннюю гидратацию цемента // Строительные материалы. 2013.№ 9. С. 94–95.
21. *Бердов Г.И.* Влияние вида и количества минеральных добавок на прочность цементного камня // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2010. № 9. С. 87–91.
22. *Kopanitsa N., Demyanenko O., Sarkisov Y., Gorshkova A.* Additives for Cement Compositions Based on Modified Peat // AIP Conference Proceedings. 2016. 1698. P. 070015.
23. *Копаница Н.О., Саркисов Ю.С, Абзаев Ю.А.* Quantitative phase analysis of modified hardened cement paste // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2017. 87. P. 092008.
24. *Kopanitsa N., Sarkisov Y., Sorokina E., Demyanenko O.* Mortars for 3D printing // MATEC Web of Conferences. 2018. 143. 02013.
25. *Klopotov V.D., Kopanitsa N.O.* New organo-mineral peat-based admixtures for cement compositions // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2015. P. 1–3.
26. *Kopanitsa N., Kudyakov A., Kovaleva M., Kopanitsa G.* System approach to peat raw materials for production of building materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Advanced Materials in Construction and Engineering. Сер. «International Scientific Conference of Young Scientists: Advanced Materials in Construction and Engineering, TSUAB 2014». 2015. P. 012011.
27. *Копаница Н.О., Касаткина А.В., Саркисов Ю.С.* Новые органоминеральные добавки на основе торфа для цементных систем // Строительные материалы. 2015. № 4. С. 93–96.
28. *Копаница Н.О., Саркисов Ю.С., Касаткина А.В.* Эффективные органоминеральные добавки на основе местного сырья // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 4 (41). С. 184–190.
29. *Копаница Н.О., Кудяков А.И., Саркисов Ю.С., Касаткина А.В.* Влияние термомодифицированного торфа на свойства цементных систем // Сухие строительные смеси. 2012. № 1. С. 30–31.

REFERENCES

1. *Warszawski A., Navon R.* Implementation of robotics in building: Current status and future prospects. *Journal of Construction Engineering and Management*. 1998. No. 124 (1). Pp. 31–41.
2. *Ibrahim M.I.* Estimating the sustainability returns of recycling construction waste from building projects. *Sustainable Cities and Society*. 2016. No. 23. Pp. 78–93.
3. *Chen L., et al.* The research status and development trend of additive manufacturing technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Pp. 1–10.

4. *Val'ter A.V.* Posloinyi sintez armirovannykh ob"emnykh izdelii [Layer-by-layer synthesis of reinforced 3D products]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*. 2011. V. 2. No. 12. Pp. 222–229. (rus)
5. *Kablov E.N.* Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda [Strategic development and processing technologies of materials till 2030]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2012. No. 5. Pp. 7–17. (rus)
6. *Gálvez J.A.* Not just a pretty face: Three-dimensional printed custom airway management devices. *3D Printing and Additive Manufacturing*. 2016. V. 3. No. 3. Pp. 160–165. (rus)
7. *Barazanchi A.* Additive Technology: update on current materials and applications in dentistry. *Journal of Prosthodontics*. 2016.
8. *Kumar L.J.* Nair current trends of additive manufacturing in the aerospace industry. *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*. 2016. Pp. 39–54.
9. *Kreiger M.A., MacAllister B.A., Wilhoit J.M.* Case The current state of 3D printing for use in construction. *Proc. Conference on Autonomous and Robotic Construction of Infrastructure*. Ames, Iowa, 2015. Pp. 149–158.
10. *Huang S.H., Liu P., Mokasdar A., Hou L*. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. V. 67. No. 5–8. Pp. 1191–1203.
11. *Udodov S.A., Belov F.A., Zolotukhina A.E.* 3D-pechat' v stroitel'stve: novoe napravlenie v tekhnologii betona i sukhikh stroitel'nykh smesei. Sbornik statei pobeditelei VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (*Proc. 6th Int. Sci. Conf. '3D Printing in Construction: New Trend in Concrete Technology and Dry Mixes'*). G.Yu. Gulyaev, Ed. Nauka i Prosveshchenie, 2017. (rus)
12. *Litovkin S.V., Pet'kova Yu.R.* Ispol'zovanie 3D pechati v mashinostroenii i stroitel'stve. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya 'Aktual'nye problemy sovremennogo mashinostroeniya' (*Proc. Int. Sci. Conf. 'Relevant Problems of Modern Engineering'*). 2015. Pp. 433–435. (rus)
13. *Grakhov V.P., Mokhnachev S.A., Borozdov O.V.* Vliyanie razvitiya 3D-tekhnologii na ekonomiku stroitel'stva. Fundamental'nye issledovaniya [3D technology effect on construction economy]. 2014. No. 11–12. Pp. 2673–2676. (rus)
14. *Hager I., Golonka A., Putanowicz R.* 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Procedia Engineering*. 2016. No. 151. Pp. 292–299.
15. *Lloret E., et al.* Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication. *Computer-Aided Design*. 2015. No. 60. Pp. 40–49.
16. *Le T.T., et al.* Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*. 2012. V. 42. Pp. 558–566.
17. *Bazhenov Yu.M.* Tekhnologiya betona [Concrete technology]. Moscow: ASV, 2002. 500 p. (rus)
18. *Sarkisov Yu.S., Kopanitsa N.O.* O nekotorykh aspektakh primeneniya nanomaterialov i nanotekhnologii v stroitel'stve [Nanomaterials and nanotechnologies in construction]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012. No. 4. Pp. 226–234. (rus)
19. *Korolev E.V., Bazhenov Yu.M., Beregovoi V.A.* Modifitsirovanie stroitel'nykh materialov nanouglerodnymi trubkami i fullerenami [Construction materials modified by nanotubes and fullerenes]. *Stroitel'nye materialy*. 2006. No. 8. Pp. 2–4. (rus)
20. *Guvalov A.A.* Vliyanie organomineral'noi dobavki na rannyuyu gidratatsiyu tsementa [Organomineral additive and cement hydration]. *Stroitel'nye materialy*. 2013. No. 9. Pp. 94–95. (rus)
21. *Berdov G.I.* Vliyanie vida i kolichestva mineral'nykh dobavok na prochnost' tsementnogo kamnya [Mineral additive amount and strength of cement paste]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanii*. 2010. No. 9. Pp. 87–91. (rus)
22. *Kopanitsa N., Demyanenko O., Sarkisov Y., Gorshkova A.* Additives for cement compositions based on modified peat. *AIP Conference Proceedings*. 2016. 1698. P. 070015.
23. *Kopanitsa N.O., Sarkisov Yu.S, Abzaev Yu.A.* Quantitative phase analysis of modified hardened cement paste. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2017. V. 87. P. 092008.
24. *Kopanitsa N., Sarkisov Y., Sorokina E., Demyanenko O.* Mortars for 3D printing. *MATEC Web of Conferences*. 2018. V. 143. P. 02013.

25. *Klopotov V.D., Kopanitsa N.O.* New organo-mineral peat-based admixtures for cement compositions. *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. 2015. Pp. 1–3.
26. *Kopanitsa N., Kudyakov A., Kovaleva M., Kopanitsa G.* System approach to peat raw materials for production of building materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Advanced Materials in Construction and Engineering. Ser. 'International Scientific Conference of Young Scientists: Advanced Materials in Construction and Engineering'*. 2015. P. 012011.
27. *Kopanitsa N.O., Kasatkina A.V., Sarkisov Yu.S.* Novye organomineral'nye dobavki na osnove torfa dlya tsementnykh sistem [New organomineral peat additives for cement systems]. *Stroitel'nye materialy*. 2015. No. 4. Pp. 93–96. (rus)
28. *Kopanitsa N.O., Sarkisov Yu.S., Kasatkina A.V.* Effektivnye organomineral'nye dobavki na osnove mestnogo syr'ya [Efficient organomineral agents based on local raw materials]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 4 (41). Pp. 184–190. (rus)
29. *Kopanitsa N.O., Kudyakov A.I., Sarkisov Yu.S., Kasatkina A.V.* Vliyanie termomodifitsirovannogo torfa na svoistva tsementnykh sistem [Cement paste properties modified by thermally-modified peat additive]. *Sukhie stroitel'nye smesi*. 2012. No. 1. Pp. 30–31(rus)

Сведения об авторах

Демьяненко Ольга Викторовна, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, demyanenko.olga.v@gmail.com

Копаница Наталья Олеговна, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kopanitsa@mail.ru

Сорокина Екатерина Александровна, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, Rtak.5@mail.ru

Authors Details

Olga V. Dem'yanenko, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, demyanenko.olga.v@gmail.com

Natalia O. Kopanitsa, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kopanitsa@mail.ru

Ekaterina A. Sorokina, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, Rtak.5@mail.ru