

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Представляемая работа посвящена решению одной из наиболее фундаментально и практически важных и актуальных проблем современного материаловедения, технологии и организации строительства – разработке новых композиционных материалов на основе минеральных вяжущих для аддитивного производства (строительной 3D-печати методом послойной экструзии), созданию научных основ для их применения в строительной практике.

В работе приведены исследования формирования структуры и свойств композиционных материалов на основе минеральных вяжущих (цементных и гипсовых), формируемых методом аддитивного производства, в зависимости от вида и количества исходного сырья, состава сырьевых смесей, технологических режимов 3D-печати, которые можно распространить на схожие рецептурные системы композиционных материалов на основе минеральных вяжущих различной сырьевой базы для их применения в строительной 3D-печати, получены модели напряженно-деформированного состояния напечатанных слоев, которые позволяют прогнозировать работу свеженапечатанных изделий и конструкций в зависимости от рецептурных, технологических и эксплуатационных факторов. Проведение исследований на макро- и на микроуровнях позволяют развить новую теорию о бетонах в технологии 3D-печати.

Разработанные составы мелкозернистых бетонов на основе цементного и гипсоцементно-пуццоланового вяжущих позволяют получать качественную строительную продукцию методом аддитивного производства различного назначения – в виде малых архитектурных форм, сухих строительных смесей, несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений (рисунок 1).

Работа выполнена в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» (направление Н1 Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта).



А) Вазон, напечатанный на 3D-принтере с использованием бетонной смеси, разработанной авторами



Б) Скамейка С-образной формы, напечатанная на 3D-принтере с использованием бетонной смеси, разработанной авторами



В) Общий вид продукции в виде сухой строительной смеси для 3D-печати, готовой к применению



Г) Общий вид коттеджного поселка «Квадрум»

Рисунок 1 – Фотоиллюстрации реализованных объектов с применением разработок авторов работы

ОСНОВНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИДЕЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ДОСТИЖЕНИЯ РАБОТЫ

Основная научно-техническая идея работы заключается в разработке научных и технологических основ управления структурой и свойствами мелкозернистых цементных и гипсоцементно-пуццолановых бетонов, формируемых методом аддитивного строительного производства (3D-печати), а также в разработке научно обоснованных технологических решений совершенствования технологии аддитивного строительного производства за счет возможности осуществления

длительных технологических перерывов и их регулирования с обеспечением высокой адгезии слоев.

Практические достижения работы:

1. **Разработаны рецептуры модифицированного цементного бетона (плотностью 2000-2500 кг/м³), формуемого методом аддитивного строительного производства (3D-печати),** характеризующиеся высокими физико-техническими показателями свойств, за счет рационального применения портландцементов с позиции минерального состава, заполнителей с позиции фракционного состава, активных минеральных и химических добавок и воды с позиции формирования оптимальных реологических свойств.

2. **Разработаны рецептуры модифицированного мелкозернистого гипсоцементно-пуццоланового бетона, формуемого методом аддитивного производства (3D-печати),** характеризующегося высокими физико-техническими показателями и водостойкостью за счет научно-обоснованного выбора гипсоцементно-пуццоланового вяжущего, заполнителей, активных минеральных, химических добавок и воды с позиций формирования оптимальных реотехнологических свойств смеси и устойчивых структур гипсоцементно-пуццолановых композитов.

3. **Усовершенствована технология аддитивного строительного производства,** позволяющая осуществлять регулируемые технологические перерывы в интервале 3-12 ч (по окончании рабочего дня/смены или при другой производственной необходимости) за счет устройства разработанного авторами модифицированного переходного слоя.

КРАТКАЯ ОЦЕНКА НОВИЗНЫ, ОТЛИЧАЮЩАЯ ДАННУЮ РАБОТУ

1. Установлены основные закономерности влияния различных рецептурных факторов (соотношение компонентов смеси, вид и содержание заполнителя, минеральных, пластифицирующих и гидрофобизирующих добавок) на реотехнологические свойства (предельное напряжение сдвига, формоустойчивость, пластическая прочность, подвижность) мелкозернистых цементных и гипсоцементно-пуццолановых бетонных смесей и физико-технические свойства бетонов на их основе, формуемых методом аддитивного строительного

производства. Предложен научно-обоснованный подход к разработке составов модифицированных мелкозернистых цементных бетонов классов В25-В40 и гипсоцементно-пуццолановых бетонов классов В15-В22,5 для 3D-печати.

2. Выявлено, что при введении в состав гипсоцементно-пуццолановой бетонной смеси комплексной добавки, состоящей из водного раствора поликарбоксилатного эфира, сополимера на основе эфиров карбоновых кислот с добавлением фосфатного компонента, гомогенной смеси олигоэтоксисилоксанов, возникает эмерджентность, обеспечивающая водостойкость композитов, повышение пределов прочности при сжатии мелкозернистых гипсоцементно-пуццолановых бетонов, формируемых методом аддитивного производства, на величину до 38,5%, формоустойчивости – до 43,7% по сравнению с контрольным составом. Установлен механизм возникновения эмерджентности, заключающийся в возникновении на поверхности частиц вяжущего дзета-потенциала, создаваемого молекулами сополимера на основе эфиров карбоновых кислот с добавлением фосфатного компонента, дополняющегося стерическим эффектом от действия боковых цепей водного раствора поликарбоксилатного эфира и взаимным отталкиванием частиц вяжущего между собой и от молекул воды, обеспечиваемым гидрофобными группами гомогенной смеси олигоэтоксисилоксанов, приводящего к увеличению диспергации частиц вяжущего и обуславливающего значительное снижение его водопотребности при одновременном замедлении кинетики начального структурообразования смеси, а также возрастание показателей прочности и водостойкости готовых изделий.

3. Установлены закономерности формирования структуры и свойств цементных МЗБ переходного слоя, модифицированных комплексными добавками, включающими ГД на основе натрийметилсилантриола в количестве 0,1-0,4% от массы вяжущего, ПД на основе нафталинсульфоната натрия в количестве 1% от массы вяжущего, бинарную смесь метакаолина и диатомита (1/1) в количестве 20% от массы вяжущего, с увеличенной продолжительностью индукционного периода гидратирующей системы за счет значительного удлинения сроков начала ее схватывания на 98-513 мин, конца схватывания – на 108-492 мин по сравнению с базовым составом МЗБ, что обеспечивает улучшение адгезионного взаимодействия

печатаемых слоев за счет наличия жидкой фазы и свободных функциональных групп на границе раздела печатаемых слоев, улучшения протекания диффузионных, химических и адсорбционных процессов в смежных слоях, печатаемых до и после технологического перерыва, достигаемое совместимостью адгезива и субстрата, их взаимным растворением.

4. Научно обосновано технологическое решение по увеличению продолжительности перерывов в процессе 3D-печати с обеспечением высокой адгезии печатаемых слоев за счет устройства в процессе 3D-печати переходного слоя из модифицированной мелкозернистой бетонной смеси, укладываемого до технологического перерыва, что приводит к повышению адгезионной прочности на 3,2%, 15%, 61,5% и 236% при продолжительности технологических перерывов 3 ч, 6 ч, 9 ч и 12 ч соответственно по сравнению с базовым составом МЗБ, печатаемым без переходного слоя.

5. Научно обосновано технологическое решение по совершенствованию технологии аддитивного строительного производства регулированием продолжительности перерывов в процессе 3D-печати, основанное на ускорении процессов структурообразования и твердения переходного слоя (увеличение средней скорости набора пластической прочности в 5,4-7,3 раза) за счет воздействия на него электрического поля при пропускании через него тока (электродный прогрев), что позволит управлять продолжительностью технологического перерыва в широком временном интервале (3-12 ч) при обеспечении высоких показателей адгезии переходного и базового слоев (1,2-1,3 МПа) и, соответственно, качества готовой строительной продукции.

6. Предложен подход по оптимизации технологических параметров аддитивного строительного производства (скорость наращивания слоев, необходимость технологических перерывов), основанного на изучении напряженно-деформированного состояния напечатанных слоев, обеспечивающего прогнозирование процессов развития их деформаций, для получения конструкций с геометрическими отклонениями в пределах нормативных значений.

7. Разработана классификация дефектов бетонов и растворов, формируемых методом 3D-печати, образующихся при формовании, твердении, эксплуатации, и

предложен состав операций и средств входного, операционного и приемочного контроля качества при возведении строительной продукции методом аддитивного строительного производства.

8. Развита теоретические представления о принципах управления структурообразованием и свойствами цементных и гипсоцементно-пуццолановых бетонных смесей и бетонов, формируемых методом аддитивного производства (3D-печати) на различных структурных уровнях и технологических этапах производства за счет рационального подхода к выбору вида и количества вяжущих, заполнителей, активных минеральных и химических добавок, воды, обеспечивающих оптимальные реотехнологические свойства сырьевой смеси, формирование сырца с заданной структурой и получение затвердевших композитов с заданными свойствами.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Актуальность работы обусловлена недостатками технологии аддитивного строительного производства (строительной 3D-печати), сдерживающим ее широкое применение, к которым следует отнести отсутствие адаптированных для данной технологии композиционных материалов, применяемых в качестве сырьевых смесей, свойства которых во многом определяют качество готовой продукции, несовершенство имеющегося оборудования, отсутствие должного нормативно-технического регулирования, квалифицированных специалистов. Применение существующих аналогов (не адаптированных) сырьевых смесей для 3D-печати приводит к появлению различных дефектов и повреждений, таких как нарушение геометрических форм, разрывы слоев, их слабая адгезия, снижение прочностных свойств, морозостойкости, скорости печати и др. Это вызывает потребность строительной отрасли в новых композиционных материалах, адаптированных для аддитивного производства (строительной 3D-печати), и разработке научных основ для их применения в строительной практике.

РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬ РАБОТЫ

1. По результатам выполнения работы авторами получено **73 патента РФ** на изобретения и полезные модели, опубликовано **103 статьи**, издано **1 учебное**

пособие, защищена 1 диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.

2. **Разработаны и внедрены практические рекомендации** по оптимизации технологических параметров формования бетонных изделий методом послойной экструзии (необходимость технологических перерывов, скорость экструзии, скорость перемещения сопла, геометрическая форма изделий) в зависимости от реотехнологических свойств сырьевых смесей (вязкость, предельное напряжение сдвига, подвижность).

3. **Разработан и внедрен СТО «Аддитивные технологии. Бетоны и растворы. Виды дефектов. Классификация»** с классификацией групп дефектов бетонов и растворов, формируемых методом аддитивного производства (3D-печати), **технологические карты** на возведение малой архитектурной формы из бетона с применением строительного 3D-принтера, на электродный прогрев модифицированного мелкозернистого бетона в технологии аддитивного строительного производства, **технологический регламент** на строительные работы при аддитивном производстве изделий и конструкций зданий и сооружений.

4. **Разработано и внедрено Изменение №6 к СП 70.13330.2012 «СНиП 3.03.01-87 Несущие и ограждающие конструкции»**, в результате которых впервые в нормативной базе определены требования к приемке бетонных и железобетонных конструкций зданий и сооружений, изготовленных по технологии аддитивного строительного производства. Данные решения апробированы при строительстве методом 3D-печати коттеджного поселка «Квадрум».

5. **Инновационная разработка** в виде малой архитектурной формы – скамейки С образной формы из разработанной модифицированной мелкозернистой бетонной смеси **внедрена при благоустройстве городских пространств г. Казани**, в частности на территории кампуса Организации.

6. **Разработана и внедрена в учебный процесс Организации учебная дисциплина «Основы аддитивных технологических процессов в строительстве».**

7. **Разработаны сухие строительные смеси** на основе портландцемента, минеральных и химических добавок для аддитивного строительного производства.

СРАВНЕНИЕ С СУЩЕСТВУЮЩИМИ ОТЕЧЕСТВЕННЫМИ И ЗАРУБЕЖНЫМИ АНАЛОГАМИ

Существуют различные отечественные и зарубежные аналоги мелкозернистых бетонных смесей для аддитивного производства (Patent CN 104891891 от 09.09.2015 г.; Патент РФ № 2661970 от 23.07.2018 г.; Электронный ресурс URL: <http://specavia.pro/articles/2238/> дата опубликования 04.04.2015 г. и др.). Выполненный анализ указанных аналогов позволил выявить их основные характеристики: формоустойчивость смеси – 3-5 см, прочность при сжатии и изгибе бетонов – 1,6-27,4 МПа и 0,9-1,3 МПа соответственно, водопоглощение бетона – 6,57-8,12%, плотность композита – 1850-1900 кг/м³, максимальная продолжительность технологического перерыва – 3-3,5 ч, кроме того, для данных аналогов смесей характерны следующие недостатки – большое количество компонентов, высокая себестоимость, наличие горючих компонентов в составе смеси (полипропиленовые волокна), низкая жизнеспособность смеси, ограниченная область применения продукции из данных смесей. Предлагаемая авторами разработка отличается более высокими реотехнологическими и физико-механическими характеристиками – формоустойчивость смеси – 18-22 см, прочность при сжатии и изгибе бетонов – 40,4-51,7 МПа и 9-9,5 МПа соответственно, водопоглощение бетона – 5,8-7,1%, плотность композита – более 2000 кг/м³, максимальная продолжительность технологического перерыва – 9 ч, это свидетельствует о том, что предлагаемая разработка является высокотехнологичной научной разработкой.

ДОСТИГНУТЫЙ СОЦИАЛЬНЫЙ И ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Экономический эффект от реализации работы в виде доходов Организации от коммерциализации результатов интеллектуальной деятельности, реализации договоров составил 6 978 500 руб. Экономическая эффективность от реализации работы обусловлена снижением стоимости производства строительной продукции из разработанных мелкозернистых бетонных смесей на 40% по сравнению с представленными на рынке аналогами, производимыми способом 3D-печати, и на 10% и 34% по сравнению с изделиями, формируемыми с использованием опалубочных

систем. Это свидетельствует о высокой экономической эффективности разработанного технологического решения, обусловленной снижением материалоемкости, отсутствием необходимости применения материально-технических и трудовых ресурсов, используемых при сборке и разборке опалубки в случае формования изделий с использованием опалубочных систем.

Социальный эффект от реализации работы обусловлен улучшением жилищных, культурно-бытовых условий граждан за счет строительства индивидуальных жилых домов и элементов благоустройства городской среды; созданием новых рабочих мест в организациях, осуществляющих аддитивное строительное производство; решением вопросов ресурсо- и энергосбережения за счет модификации смесей, сокращения затрат на производство бетонов, а также снижения энергетических затрат на строительное производство; снижения производственного травматизма за счет автоматизации производства. Кроме того, значимым социальным эффектом является внедрение результатов выдвигаемой работы при подготовке специалистов строительной отрасли – в учебный процесс Организации в рамках учебной дисциплины «Основы аддитивных технологических процессов в строительстве» в виде лекционного курса, при выполнении курсовых работ, а также при выполнении выпускных квалификационных работ при подготовке магистров направления 08.04.01 «Строительство», направленности (профиль) «Технология и организация строительства».