

УДК 69.001.5

Кропачев Р.В.

Казанский национальный исследовательский технологический университет

Ахтямова Э.Р.

Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева

Мухаметзянова З.Р.

МБОУ Гимназия № 54

Зиганшин Р.Т.

Университет управления «ТИСБИ»

Дибиров А.К.

Казанский национальный исследовательский технологический университет

ПОВЫШЕНИЕ СВОЙСТВ БЕТОНА ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

В работе проведен анализ материалов, используемых при 3D-печати в строительстве. Для повышения производительности и обеспечения высокого качества 3D-печати необходимо применение бетона с повышенными свойствами. Предложено использовать для 3D-печати полимерный бетон. Полимерному бетону характерны более высокие физико-механические свойства и долговечность. Повышенная тиксотропность и текучесть полимерного бетона позволяют регулировать сроки его схватывания при 3D-печати с обеспечением высокой прочности.

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

Постановка проблемы. Для строительной отрасли характерно потребление невозобновляемых ресурсов и природных материалов в огромных объемах [1, с. 79]. При этом в строительной отрасли возникают проблемы, связанные с низкой производительностью труда, высокой статистикой аварийных ситуаций на площадках во время строительства, сложностью контроля всех процессов, недостатком квалифицированных рабочих [2, с. 32]. Решением этих проблем является применение 3D-печати, которая получает все большее распространение в строительной сфере [3, с. 62].

Данный факт связан с тем, что технология образования элементов зданий и сооружений с помощью строительной 3D-печати имеет преимущества в сравнении с известными способами бетонирования, заключающиеся в экономии ресурсов, оперативном и точном создании сложных архитектурных форм строящихся зданий.

Возможности 3D-печати и технологии, которые разработаны в мировых лабораториях, позволяют перейти на совершенно новый уровень их применения, а использование технологий послойного синтеза открывает новые возможности при построении бетонных конструкций.

Во всем мире практики-разработчики пытаются решить проблему по подбору строительных материалов для 3D-печати. Поэтому для применения строительной 3D-печати необходимо выполнить изучение и разработку новейших материалов, которым будут свойственны высокие характеристики и долговечность.

Применение обычного бетона для 3D-печати в строительстве невозможно, поскольку существуют требования к таким материалам [4, с. 293]. При выполнении оптимизационных процессов 3D-печати должна учитываться сила сцепления слоев материала, а сам материал должен достаточно быстро затвердевать для выдержки веса уже нанесенных слоев без протекания процессов деформации. Для снижения временного интервала при 3D-печати между смежными слоями с обеспечением достаточной прочности и протекания процесса прочного сцепления между осажденными слоями необходимо применение бетона с повышенными свойствами.

Анализ последних исследований и публикаций. Присадочное производство и цифровое производство привносят новые горизонты в производство бетона и цементного материала при 3D-печати. Возможность строительства бетонных

конструкцій без опалубки являється основним перевагою з точки зору темпів виробництва, архітектурної свободи і скорочення витрат; як зазначено в роботі «Implementation of robotics in building: Current status and future prospects» [3, с. 63], опалубка становить 35–60% від загальних витрат на конкретні конструкції.

Більше того, 3D-друк дозволяє замінити людську працю роботами з цифровим управлінням і реалізувати нові методи в різних умовах [2].

В останні роки інтенсивно розробляються різні методи; наприклад, інтелектуальне динамічне лиття є результатом комбінації методів осадки і цифрової обробки [1; 3]. Друге сімейство цифрового виробництва асоціюється з технологією 3D-друку [4]. Цей метод зазвичай називають «додавочним виробництвом» і складається з об'єднання матеріалів для створення об'єктів, шар за шаром, з даних 3D-моделі. Прикладами таких методів, що належать до цього сімейства цифрової технології, є процес «бетонного друку», розроблений в Університеті Лафборо [4] і метод «Контурний крафт» [5], розроблений в Університеті Південної Каліфорнії.

Одним із способів осадки в будівництві бетону є об'єднання екструзії бетону з використанням цифрових технологій виготовлення. Як зазначають дослідники в статті «3D-друк в будівництві» [4], метою є масштабування настільного 3D-принтера до розміру будівельної площадки. В даний час такі методи не достатньо розвинені для промислового застосування, але вдається створювати стінові елементи в лабораторних умовах [5].

Тем не менше, сама присадочна технологія екструзії може бути застосована для ефективного і надійного процесів в будівництві, причому в промислових масштабах. Для досягнення цієї мети і оптимізації процесу необхідно подолати два основні обмеження [4]: по-перше, міцність з'єднання між сусідніми шарами, яка є слабкою стороною друкованої структури. Варто зазначити, що сила сцеплення буде зменшуватися з часом проміжком між нанесеними шарами [5]. Другим обмеженням є процес затвердіння матеріалу при 3D-друку з течією часу. Матеріал повинен мати достатню твердість для витримки всього ваги посаджених внаслідок сусідніх шарів. Це обмеження призводить до збільшення часу всього будівельного виробництва.

В цьому випадку оптимальний часовий проміжок між нанесеними шарами повинен бути мінімальним, що дозволить забезпечити стабільність і стійкість конструкції в час будівництва. Такий оптимізований часовий проміжок забезпечує максимальну міцність сцеплення і швидкість будівництва, сумісну з стабільною структурою осадженого бетону при 3D-друку.

Здатність осаджених шарів підтримувати власну вагу пов'язана з його реологією і, зокрема, з межею текучості [4]. В час поступового будівництва стіна першого осадженого шару піддається найважчій навантаженню. Щоб забезпечити стабільність стінки в час процесу, межа текучості повинна бути достатньою для підтримки цієї навантаженню. В цей момент виникає новий парадокс: бетон повинен бути достатньо рідким при екструзії [4], але і достатньо міцним для механічної стабільності структури. Цей парадокс вирішується використанням структурного нарощування бетону при 3D-друку з забезпеченням як достатньої текучості при екструзії, так і стабільності після внесення. Межа текучості бетону з часом збільшується [5]; це оборотне поведіння обумовлено зародженням зерен цементу в момент їх контакту в час періоду спокою до моменту схватывання [4]. Таке збільшення межі текучості зазвичай моделюється з використанням лінійної залежності від часу спокою [5] в час першого часу застигання. Вченими запропонована експоненціальна залежність, яка описує збільшення межі текучості бетону до моменту схватывання [5]. Тут же показано, що конструктивні властивості цементних матеріалів можуть використовуватися для прогнозування або оптимізації виробництва бетону. Наприклад, може бути передбачено зменшення тиску опалубки або проблеми лиття різного шару з використанням швидкості нарощування структури самоуплотняючого бетону [4–8]. В даному випадку структурне нарощування використовується для описування і моделювання процесів збільшення навантаженню, пов'язаного з швидкістю будівництва, і механічної міцності першого осадженого шару бетонної структури.

Існуюча технологія «Контурне будівництво» (КС) [5] – це технологія виготовлення присадок для бетону, в якій присутній комп'ютерний контроль використання найкращих властивостей бетонів при 3D-друку для створення гладких, точних і плоских поверхностей форми з екструдованих матеріалів. Один із важ-

ных аспектов КС – это более низкая стоимость строительства, высокая скорость строительства, гибкость архитектурного дизайна, безопасность и охрана окружающей среды.

Работающие по технологии КС контурные роботы для строительства были разработаны для создания крупных строительных конструкций. Эти машины объединяют процесс экструзии для формирования поверхностей объекта и процесса наполнения (путем заливки или экструзии) для создания основы объекта. При этом с использованием роботов КС могут быть созданы полые стенки с гофрированной внутренней структурой [6]. Роботы КС легки и могут быть быстро собраны, разобраны и транспортированы небольшой командой. Операция по строительству может быть полностью автоматизирована, что требует минимального контроля.

Постановка задания. В данной статье необходимо предложить использование бетона с повышенными свойствами для 3D-печати в строительстве.

Изложение основного материала исследования. Многие исследования в области цифровых технологий изготовления показали, что скорость строительства при 3D-печати влияет на производительность процесса [1–10].

Для сравнения механической прочности нижнего первого осажденного слоя с механической нагрузкой всего веса осажденных слоев необходимо производить моделирование эволюции механической прочности цементного материала до гидратации (которая определяется напряжением текучести материала), так и эволюции во времени механической нагрузки от самой строительной конструкции. При этом необходимо определить возможность слоистой структуры поддерживать собственный вес и момент наступления сбоя, т.е. когда структура начнет разрушаться.

В случае рассмотрения конструкции стены или колонны вертикальное напряжение, действующее на первый осажденный слой, увеличивается со временем с построенной высотой конструкции. Даже если вертикальное напряжение постепенно увеличивается по мере того, как наносятся новые слои, средняя скорость строительства может быть вычислена за время всего строительства. Первоначально было бы естественным выбирать постоянную скорость вертикальной конструкции.

В работе для сравнения послойного нанесения при 3D-печати предлагается использовать полимерный бетон, технология получения которого основана на идее использования неорганических минеральных веществ.

Для проверки данного вида бетона моделируем нагрузку, действующую на цилиндрический образец (т.е. первый осажденный слой) как на конструкцию слой за слоем в цилиндрической колонне. Цилиндрический образец принимаем равным высотой 35 мм с диаметром 60 мм. Начальный предел текучести материала составляет $6 \cdot 10^3$ Па, что достаточно для обеспечения необходимой силы для преодоления гравитационного эффекта; следовательно, полученный образец может поддерживать свой собственный вес. Усилие выхода материала выше, чем в других исследованиях [1–5] (порядок 1–4 кПа), но находится в диапазоне предела текучести материала, который используется для контурной обработки, например, разработанный в Университете Южной Калифорнии.

Для достижения такого значения предела текучести использовали полимерный бетон, содержащий цемент, каолин и известковый наполнитель. Содержание сухого связующего составляло 50% цемента, 25% известнякового наполнителя и 25% каолина. Соотношение «вода/цемент» составляло 0,41, и к смеси добавляли полимерный порошок поликарбоксилатного типа SP (отношение массы SP / цемент составляло 0,3%).

В данном бетоне используется цемент М600 с удельной плотностью $3,15 \text{ кг/см}^3$. Удельная площадь поверхности цемента, измеренная с использованием устройства Блейна, составляла $3 \text{ 390 см}^2/\text{г}$ со средним размером частиц 10 мкм. Используемая каолиновая глина является порошкообразным веществом. Удельный вес глины составлял $2,65 \text{ кг/см}^3$, наибольший размер зерен глины составлял около 40 мкм и средний размер зерен около 9 мкм. Известняковый наполнитель имел распределение частиц по размерам от 0,1 до 100 мкм.

Смеси готовили смешиванием компонентов сухого порошка в течение 2 мин при 60 об/мин, а затем воду смешивали с цементом в планетарном смесителе. Фаза смешения состояла из двух этапов: 2 мин при 140 об/мин и 3 мин при 280 об/мин.

Чтобы смоделировать загрузку по структуре слой за слоем, образец, соответствующий первому осажденному слою, был помещен между двумя параллельными пластинами. Затем верхнюю пластину загружали с шагом 1,5 Н. Временной промежуток между каждым приращением нагрузки позволял контролировать среднюю норму строительства. Временной промежуток – в диапазоне от 11 до 60 с., что позволяет моделировать трехмерную печать столбцов со средней скоростью построения от 1,1 до 6 м/ч. Когда

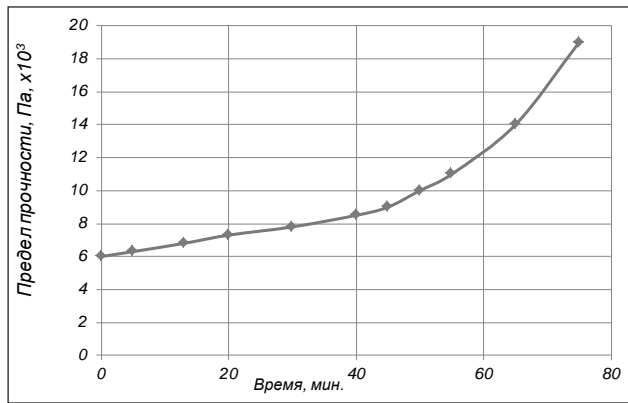


Рис. 1. Изменение предела текучести полимерного бетона со временем

критическое напряжение превышено, можно ожидать, что образец будет пластически деформироваться. Чтобы обнаружить этот пластиковый сбой, смещение верхней пластинки регистрировалось относительно времени с использованием преобразователя смещения; одновременно во время испытания контролируется начало трещин на поверхности образца. Каждый раз зазор проверялся, по меньшей мере, дважды, чтобы проверить повторяемость теста.

После смешивания измерения проводились в течение 90 минут. Таким образом, эволюция предела текучести материала полимерного бетона характеризовалась относительно времени покоя.

Измерение роста прочности проводили примерно каждые 10 мин при постоянной скорости сдвига $0,001 \text{ с}^{-1}$. Все образцы оставались в состоянии покоя с окончания процесса перемешивания.

Предел текучести полимерного бетона измеряли с использованием реометра, оборудованного необходимой геометрией лопастей. Через 1 мин предварительного сдвига на образец наносился новый слой со скоростью сдвига $0,001 \text{ с}^{-1}$ в течение 180 с. При такой низкой скорости сдвига вязкие эффекты незначительны, а предел текучести может быть рассчитан по измеренному значению максимального крутящего момента. Геометрия лопасти состояла из четырех лопастей, расположенных вокруг цилиндрического вала. Для каждого измерения использовали лопасть высотой 8 мм и диаметром 8 мм. В конце измерения предела текучести лопасть удаляли из образца и очищали, чтобы выполнить другое измерение образца, взятого из той же партии, которая была предварительно помещена в другой контейнер после смешивания.

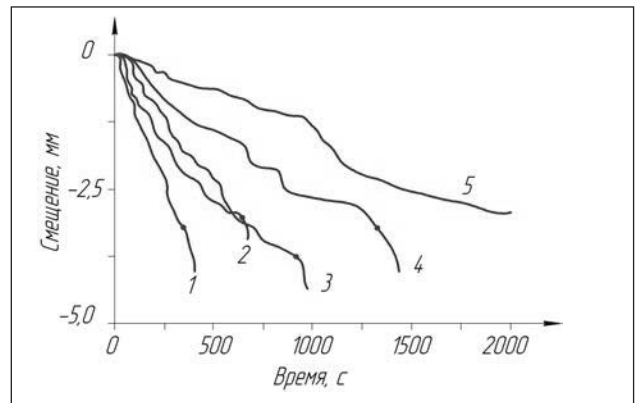


Рис. 2. Смещение верхней пластины для образца полимерного бетона в зависимости от времени на: 1 – 11 с; 2 – 17 с; 3 – 22 с; 4 – 34 с; 5 – 60 с

Для образца полимерного бетона изменение предела текучести со временем в состоянии покоя показано на рис. 1.

Рис. 1 ясно показывает, что изменение предела текучести испытанного полимерного бетона со временем может считаться линейным в течение первых 40 мин. Отсюда следует, что линейную модель Русселя [9] можно использовать для описания эволюции предела текучести для строительного процесса, продолжающегося меньше этого критического времени. Для более длительного процесса модель Перрота лучше описывает увеличение предела текучести [7].

Комбинация контрольного начала разрушения с записью перемещения верхней пластины обеспечивает совместное доказательство пластификации образца. На рис. 2 показано зарегистрированное смещение верхней пластины для временного зазора между каждым слоем на 11, 17, 22 и 34 с. Для каждого промежутка времени сообщается момент, когда появляются трещины на поверхности образца полимерного бетона. Можно допустить, что трещины образца полимерного бетона происходят при возникновении процессов начала разрушения на поверхности и увеличения скорости смещения.

На рис. 2 кружочками указан момент, когда трещины наблюдаются на поверхности образцов полимерного бетона для временного промежутка в пределах от 11 до 60 с.

Выводы. В работе проведен анализ материалов, используемых при 3D-печати в строительстве. При этом установлено, что для повышения технико-экономических показателей строительной отрасли и обеспечения высокого качества 3D-печати необходимо применение бетона с повышенными свойствами. Поэтому был предложен для применения в 3D-печати полимерный

бетон, для которого характерны более высокие свойства и долговечность.

Полученные результаты по применению полимерного бетона подтверждаются путем моделирования нагрузки при добавлении слоев в колонну

диаметром 60 мм. Установлено, что благодаря повышенной тиксотропности и текучести полимерного бетона появляется возможность регулировать сроки его схватывания при 3D-печати с обеспечением высокой прочности.

Список литературы:

1. Ibrahim M.I. M. Estimating the sustainability returns of recycling construction waste from building projects. *Sustainable Cities and Society*. 2016. No. 23. С. 78–93.
2. Di Carlo T., Khoshnevis B., Carlson A. Experimental And Numerical Techniques To Characterize Structural Properties Of Fresh Concrete. ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineer. 2013. С. V009T10A062-V009T10A062.
3. 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.
4. 3D-печать в строительстве / Н.И. Ватин, Л.И. Чумадова, И.С. Гончаров, В.В. Зыкова, А.Н. Карпеня, А.А. Ким, Е.А. Финашенков. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2017. № 1 (52). С. 27–46.
5. Hager I., Golonka A., Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Procedia Engineering*. 2016. No. 151. С. 292–299.
6. Grugel R.N., Toutanji H. Sulfur “concrete” for lunar applications—Sublimation concerns. *Advances in Space Research*. 2008. Т. 41. No. 1. С. 103–112.
7. Perrot A., Rangedard D., Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures*. 2016. Т. 49. No. 4. С. 1213–1220.
8. Wallevik J.E. Rheological properties of cement paste: thixotropic behavior and structural breakdown. *Cement and Concrete Research*. 2009. Т. 39. No. 1. С. 14–29.
9. Zhang J., Khoshnevis B. Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting. *Automation in Construction*. 2013. No. 29. С. 50–67.
10. Bederina M., Makhloufi Z., Bouziani T. Effect of limestone fillers the physic-mechanical properties of limestone concrete. *Physics Procedia*. 2011. No. 21. С. 28–34.

ПІДВИЩЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕТОНУ ДЛЯ 3D-ДРУКУ

У роботі проведено аналіз використовуваних матеріалів для 3D друку в будівництві. Для підвищення продуктивності і забезпечення високої якості 3D друку необхідне застосування бетону з підвищеними властивостями. Запропоновано використовувати полімерний бетон для 3D-друку. Полімерному бетону притаманні вищі фізико-механічні властивості і довговічність. Підвищена тиксотропність і текучість полімерного бетону дають змогу регулювати терміни його схоплювання під час 3D-друку із забезпеченням високої міцності.

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

IMPROVING THE PROPERTIES OF CONCRETE FOR 3D PRINTING

In work the analysis of used materials is carried out at 3D printing in construction. To increase productivity and ensure high quality 3D printing, it is necessary to use concrete with enhanced properties. It is proposed to use polymer concrete for 3D printing. Polymer concrete is characterized by higher physical and mechanical properties and durability. Increased thixotropy and fluidity of polymer concrete allows adjusting the time of its setting with 3D printing with ensuring high strength.

Key words: 3D printing, concrete, properties, construction, materials.