

ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ФОРМОВОЧНЫХ СВОЙСТВ БЕТОННОЙ СМЕСИ ДЛЯ 3D-БЕТОНИРОВАНИЯ

Самуйлов Ю.Д., Батяновский Э.И.

ВВЕДЕНИЕ

Быстрое развитие и внедрение аддитивной технологии в строительный сектор экономики обусловлено тем, что данная технология имеет ряд существенных преимуществ, по сравнению с другими методами ведения бетонных работ. Главными ожидаемыми преимуществами являются: значительная экономия материальных затрат и весьма существенная экономия временных ресурсов, так как реализуется «безопалубочный» метод бетонирования, включая возможность быстрого и точного создания сложных архитектурных форм строящегося здания.

В связи с широким интересом к аддитивной технологии в строительстве, в Республике Беларусь также начата ее разработка. В настоящее время в БНТУ ведутся работы по созданию вариативной имитационной модели аддитивного процесса производства изделий из бетоно-композитных материалов с использованием разомкнутых кинематических механизмов методом натурного прототипирования. Конечная цель данного проекта – это разработка оборудования и технологии устройства стен, перегородок и других конструктивных элементов зданий при помощи строительной 3D-печати. На основании анализа имеющейся информации были сформулированы задачи исследований, которые включали: разработку технических требований к бетонным смесям, методики оценки их свойств и соответствия этих свойств заданным требованиям, а также разработку составов смесей, обеспечивающих реализацию этой специфичной технологии бетонирования.

В материале настоящей статьи представлены основные положения разработанных и представленных методик для оценки формовочных свойств бетонных смесей, предназначенных для 3D-бетонирования.

ОБЩАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Примененная методология исследований связана с решением комплексной задачи по созданию бетонокомпозита с требуемыми прочностными характеристиками, исходная смесь которого должна обеспечивать возможность экструзионного формования деформирующимся пластичным объемом, приобретающим в процессе подачи через насадку (сопло) требуемую (эллипсоидную) форму, способную сохранять ее в заданных геометрических размерах, а также воспринимать нагрузки от массы и динамических воздействий при укладке последующих ее слоев с некоторой заданной скоростью (~ 19 слоев/час).

Для решения такой комплексной задачи было необходимо в поисковом порядке (т. к. имеющиеся на рынке материалы и научно-техническая информация о составах смесей для 3D-бетонирования являются «ноу-хау» фирм-производителей), определить:

- требуемую исходную пластичность смеси, т. е. ее консистенцию, способную держать заданную форму сразу после «выдавливания», и динамику роста несущей способности слоя смеси во времени;

- экспериментальным путем выявить соответствие динамики изменений реологических свойств (пластической прочности) смеси различных составов на соответствие заданным требованиям;

- подобрать стандартизированные и разработать собственные (вариативные) методики как для оценки свойств бетонной смеси, так и для оценки их соответствия условиям бетонирования методом «3D-печати».

В итоге, в исследованиях оценки свойств бетонных смесей были использованы как стандартизированные методики и оснащение (в частности по оценке свойств цемента), так и вариационные методики, приспособленные к решению конкретных задач, описание и особенности которых отражены в тексте, в его соответствующих разделах.

Условия проведения испытаний соответствовали требованиям к лабораторным испытаниям бетонных смесей и бетона (СТБ 1545-2005; ГОСТ 10180-2012), в частности, температура воздуха - $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, при относительной влажности $(65 \pm 5)\%$.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СМЕСЯМ

Технологические требования к смесям для 3D-бетонирования представлены в таблице 1. Они отражают экспериментально выявленные требования к бетонным смесям, которые обеспечивают необходимые условия для послойного, последовательного формирования путем наращивания слоев смеси.

Таблица 1 – Технологические требования к смесям для 3D-бетонирования

Характеристика	Наименование методики	Требование
Пластичность смеси по деформации конуса (ДК), мм	МЕТОДИКА 1	1...5
Способность смеси держать форму	МЕТОДИКА 1	Конус должен лежать монолитно, не должен давать трещин, рассыпаться и терять фрагменты
Динамика роста несущей способности смеси во времени	МЕТОДИКА 2	Рост несущей способности смеси должен превышать рост давления на уложенный слой
Консистенция смеси	МЕТОДИКА 3	«Мягкий» пластилин

Оценка технологических свойств бетонной смеси по указанным характеристикам осуществляется последовательно по приведенным далее методикам.

Методика 1: определение пластичности смеси и ее способности держать форму сразу после выдавливания заключается в определении величины усадки отформованной смеси после снятия кольца к прибору Вика (по ГОСТ 310.3-76) и визуальной фиксации способности смеси к сохранению конической формы.

Аппаратура и вспомогательные материалы: термометр ртутный ТМ-6-1 ($-30 \pm 50^\circ\text{C}$ $\pm 0,2^\circ\text{C}$); психрометр аспирационный МВ-4М ($10-100\% \pm 6\% \pm 2\%$); кольцо к прибору Вика; две стальные пластины ($100 \times 100 \times 2\text{мм}$); линейка металлическая ($0 \div 150\text{мм}$); штангенциркуль $0 \div 300\text{мм}$.

Подготовка к проведению испытаний: для проведения испытания предварительно готовят бетонокомпозитную смесь, кольцо к прибору Вика смазывают антиадгезионным составом.

Проведение испытаний: приготовленную смесь укладывают в кольцо к прибору Вика, установленное на стальную пластину. Постукиванием о стол смесь в кольцо выравнивают заподлицо с верхней гранью кольца. Через 5...10 с после укладки смеси кольцо снимают и ставят рядом с отформованной смесью на вторую стальную пластину. На кольцо ребром укладывают штангенциркуль и линейкой измеряют вертикальную деформацию конуса (ДК) (рис. 1). Оценивают способность смеси держать форму по состоянию конуса после снятия кольца.

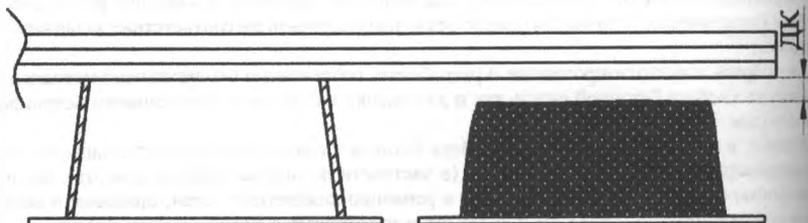


Рисунок 1 – Определение «ДК»

Оценка результатов: пластичность смеси ДК фиксируют в мм (с точностью – 1 мм). Для возможности применения смеси в аддитивной технологии ДК должна быть в диапазоне 1... 5 мм. Оценка формы конуса: смесь должна лежать монолитно, конус не должен давать трещин, рассыпаться и терять фрагменты.

Методика 2: определение динамики роста несущей способности смеси во времени заключается в определении роста со временем сопротивления смеси усилию вдавливания индентора в ее массив.

Аппаратура и вспомогательные материалы: термометр ртутный ТМ-6-1 (-30...+50 °С ±0,2°С); психрометр аспирационный МВ-4М (10-100% ±6%÷2%); кольцо к прибору Вика; стальная пластина (100×100×2 мм); разрывная машина Z100; индентор (рис. 2).

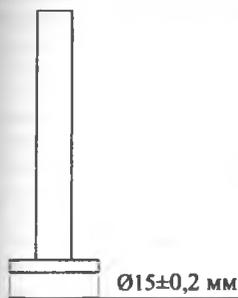


Рисунок 2 – Индентор для оценки несущей способности смеси

Подготовка к проведению испытаний: для проведения испытания предварительно готовят бетонокомпозитную смесь.

Проведение испытаний: приготовленную смесь укладывают в кольцо к прибору Вика, установленное на стальную пластину. Постукиванием о стол смесь в кольце выравнивают заподлицо с верхней гранью кольца. Далее кольцо на пластине со смесью устанавливают в разрывную машину и укладывают на верхнюю грань смеси индентор. Индентор вдавливают в массив смеси (скорость погружения – 5 мм/мин, глубина погружения – 3 мм). Значением несущей способности смеси принимается ее сопротивление вдавливающему индентору на глубину 1 мм. Операцию повторяют с определенным временным шагом (но не более 15 мин), каждый раз устанавливая индентор на незатронутую ранее часть верхней грани смеси.

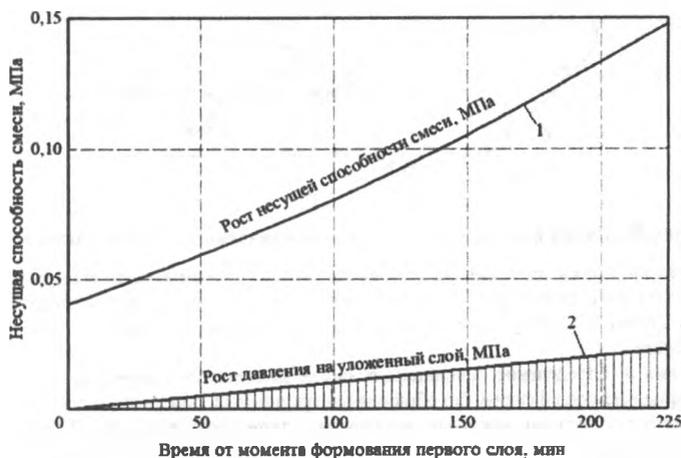


Рисунок 3

Оценка результатов: фиксируют время, прошедшее с момента укладки смеси в кольцо, и график «нагрузка-деформация» при каждом вдавливании. Смесь проходит испытание, если

график динамики роста несущей способности смеси будет лежать выше графика динамики роста давления на уложенный в основание формуемого массива слой (рис. 3).

При этом величину давления (P , МПа) укладываемого расчетного числа слоев рассчитывают двумя способами:

1 способ (эмпирический) (рис. 4): $P = n \cdot m \cdot g / (L \cdot b)$, МПа (где n [шт.] – число слоев, уложенных на основной слой; m [кг] – масса 1-го слоя длиной L [мм], g – ускорение свободного падения $[9,81 \text{ м/с}^2]$; b [мм] – ширина основания слоя). Масса слоя определяется путем взвешивания свежееотформованного фрагмента слоя длиной 1 м. Ширина основания слоя замеряется штангенциркулем с точностью до 0,1 мм в 3 различных точках уже схватившегося фрагмента слоя, и вычисляется среднее арифметическое из трех результатов измерений. Длина фрагмента слоя контролируется измерительным инструментом, с точностью до 1 мм.



Рисунок 4 – Схема фрагмента слоя

2 способ (аналитический): для реализации данного метода задаются параметры: B (ширина слоя, м) и h (высота слоя, м), плотность бетонокомпозитной смеси принимается равной 2400 кг/м^3 . Далее вычисляется масса (m , кг) погонного метра слоя по схеме рис. 5.

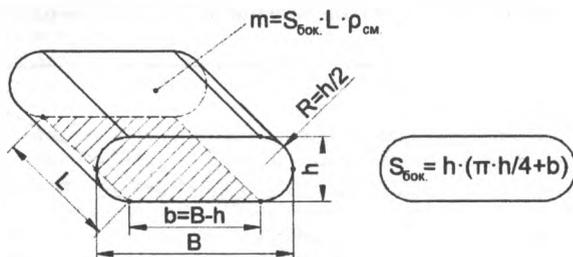


Рисунок 5 – Схема фрагмента слоя для аналитического способа расчета давления

Затем вычисляется давление на основной слой со стороны вышележащих по формуле: $P = n \cdot m \cdot g / (L \cdot b)$, МПа (где n [шт.] – число слоев, уложенных на основной слой; m [кг] – масса 1-го слоя длиной L [мм], g – ускорение свободного падения $[9,81 \text{ м/с}^2]$; b [мм] – ширина основания слоя).

Методика 3: определение консистенции смеси заключается в определении ее способности держать придаваемую ей форму без образования трещин, т. е. пластически деформироваться.

Аппаратура и вспомогательные материалы: термометр ртутный ТМ-6-1 ($-30 \div +50 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,2^\circ\text{C}$); психрометр аспирационный МВ-4М ($10-100\% \pm 6\% \div 2\%$); штангенциркуль $0 \div 150 \text{ мм}$; две стальные пластины ($100 \times 100 \times 2 \text{ мм}$); два стержня длиной 100 мм и диаметром 10 мм.

Подготовка к проведению испытаний: для проведения испытания предварительно готовят бетонокомпозитную смесь.

Проведение испытаний: приготовленную смесь укладывают в кольцо к прибору Вика, установленное на стальную пластину. Берут в руку пробу смеси, достаточную для формирования шарика диаметром 20...25 мм, руками скатывают из нее шарик. Кладут шарик на первую стальную пластину. Укладывают на первую стальную пластину стержни диаметром 10 мм, по разные стороны от шарика из испытываемой смеси, накрывают шарик из смеси второй стальной пластиной и прижимают ею шарик до соприкосновения пластины со стержнями.

Оценка результатов: консистенция смеси соответствует консистенции «мягкого» пластилина, если: при формировании шарика смесь не растрескивается, после сжатия шарика в лещку толщиной 10 мм смесь сохраняет форму без образования трещин и не распадается на фрагменты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определены основные технологические (пластические) свойства бетонокомпозитных смесей для технологии 3D-бетонирования и сформулированы предъявляемые к ним требования. Они отражают необходимость обеспечения нормального перемещения смеси по подвижным шлангам, качественной укладки слоев и сохранения ими формы, как в процессе укладки слоя, так и при последующем многослойном формировании конструкции.

2. Разработаны и прошли экспериментальную апробацию методики оценки: консистенции (пластичности) смеси; способности смеси удерживать приданную форму укладываемого слоя и при послойном формировании; кинетики роста пластической прочности (или несущей способности), обеспечивающей возможность многослойного формирования с использованием технологии 3D-бетонирования.

3. Обоснованы важнейшие требования к технологическим свойствам бетонных смесей, совокупность которых обеспечивает возможность их применения для технологии 3D-бетонирования.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема [Текст]: ГОСТ 310.3-76. – Введ. 1984-08-01. – Москва: Издательство стандартов, 2013. – 11 с.

2. Смеси бетонные. Методы испытаний [Текст]: СТБ 1545-2005. – Введ. 2005-07-01. – Минск: Минстройархитектуры, 2005. – 24 с.

3. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам [Текст]: ГОСТ 10180-2012. – Введ. 2016-02-01. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 36 с.