

Строительные материалы и изделия

Научная статья
УДК 666.9.03
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-4/56-65>

Е.А. Бритвина, Г.С. Славчева

БРИТВИНА ЕКАТЕРИНА АЛЕКСЕЕВНА – аспирант, sos71@list.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-0462-4991>
СЛАВЧЕВА ГАЛИНА СТАНИСЛАВОВНА – д.т.н., профессор, gslavcheva@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-8800-2657>
Кафедра технологии строительных материалов, изделий и конструкций
Воронежский государственный технический университет
Воронеж, Россия

Показатели технологичности цементных смесей для строительной 3D-печати: моделирование и экспериментальные исследования

Аннотация: Представлены результаты экспериментальных исследований реологического поведения цементно-песчаных смесей для 3D-печати. Для изучения реологического поведения, в частности оценки формоустойчивости показателя пластичности, использованы сдавливающие тесты с постоянной скоростью деформирования. Найдены значения структурной и пластической прочности, пластических деформаций цементных систем, характеризующие их способность сохранять форму при действии возрастающих сжимающих напряжений в процессе печати. Охарактеризованы особенности реологического поведения, получены количественные данные о влиянии содержания песка заданной granulometрии на пластичность и формоустойчивость цементных смесей. Определено рациональное содержание песка в составе смесей, при котором обеспечиваются критериальные для процессов 3D-печати значения показателей пластичности, структурной прочности и деформативности. На основании результатов моделирования структуры показано, что регулирование вязко-пластических свойств цементных систем при изменении содержания заполнителя определяется толщиной прослойки цементного теста как условно однородной дисперсионной среды. Эту величину предложено рассматривать в качестве критериальной структурной характеристики, определяющей тип реологического поведения смесей для 3D-печати.

Ключевые слова: 3D-печать, цементная смесь, реология, пластичность, формоустойчивость, моделирование

Для цитирования: Бритвина Е.А., Славчева Г.С. Показатели технологичности цементных смесей для строительной 3D-печати: моделирование и экспериментальные исследования // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2021. № 4(49). С. 56–65. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-4/56-65>

Введение

Активное внедрение аддитивного производства в строительную отрасль привело к большому спросу на качественно новые материалы, позволяющие обеспечить безопасную печать строительных объектов заданного уровня качества. За период развития строительной 3D-печати экспериментально получено и апробировано значительное количество разновидностей композитов, адаптированных к технологии послойной печати. Анализ результатов исследований показывает, что компонентный состав большинства полученных композитов включает [1, 6, 9, 10]:

- цементное вяжущее, обеспечивающее сцепление компонентов смеси и пластическое течение смеси;

- крупнодисперсные наполнители и микродисперсные наполнители, влияющие на устойчивость системы к внешним воздействиям;
- пластифицирующие добавки, влияющие на свойства дисперсной фазы и изменяющие пластическое течение смеси;
- модифицирующие добавки, влияющие на пластичность и формоустойчивость смеси в зависимости от механизма воздействия;
- армирующие компоненты для снижения деформативности смеси и получаемого композита;
- пониженное водоцементное отношение.

Однако во всех проанализированных исследованиях [7, 8, 10, 11, 13] однозначно не установлены механизм и мера воздействия компонентов на показатели технологичности 3D-печатных цементных смесей:

- перекачиваемость, обеспечивающая эффективную транспортировку смеси к подающему механизму;
- экструдированность, необходимая для формирования бездефектного слоя в момент его печати;
- формоустойчивость – способность напечатанного слоя сохранять форму и воспринимать нагрузку от вышележащих слоев.

Теоретической основой постановки исследований являются классические положения структурной реологии гетерогенных дисперсных систем П.А. Ребиндера, обобщенно изложенные в работе Н.Б. Урьева [4]. В рамках данного подхода структура вязко-пластичной цементной смеси рассматривается как неоднородная гетерогенная система «дисперсная фаза + дисперсионная среда». При этом полагается, что показатели технологичности в цикле 3D-печати определяются балансом сил внешних динамических и статических воздействий и способностью структуры сохранять прочность и агрегативную устойчивость в процессе транспортировки, экструзии, укладки.

В предыдущих исследованиях [2] были сформулированы основные структурные факторы (рис. 1) и технологические средства управления показателями технологичности смесей для строительной 3D-печати посредством регулирования свойств дисперсной фазы (ДФ), дисперсионной среды (ДС) и их концентрационных соотношений в смеси.

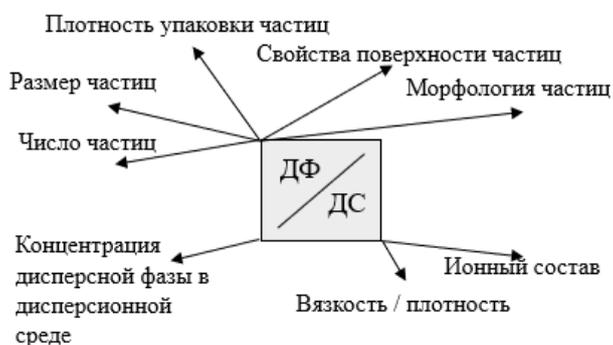


Рис. 1. Структурные факторы управления технологическими свойствами смесей для 3D-печати как вязко-пластичных дисперсных систем

Показано, что прочность и агрегативная устойчивость структуры, реологическое поведение смесей регулируется за счет изменения:

- объемной концентрации частиц дисперсной фазы в дисперсионной среде (технологический фактор В/Т),
- размера частиц дисперсной фазы (технологический фактор регулирования дисперсности и вида цемента и наполнителей),
- свойств дисперсионной среды – плотности и вязкости (технологический фактор регулирования вида и концентрации химических добавок - пластификаторов, модификаторов вязкости, регуляторов структурообразования).

В ранее проведенных исследованиях [3, 5] экспериментально установлены технологические факторы, влияющие на изменение свойств дисперсионной среды:

- вид и дозировка суперпластификаторов, рассматриваемых в качестве регуляторов пластичности;
- вид и дозировка модификаторов вязкости, рассматриваемых в качестве регуляторов формоустойчивости.

В данной работе экспериментально оценена результативность и определены в составе смеси рациональные границы варьирования заполнителя, рассматриваемого в качестве фактора регулирования характеристик дисперсной фазы.

Цель работы – обоснование количественного содержания заполнителей заданной гранулометрии и дисперсности в цементных гетерогенных дисперсных системах, адаптированных по своим реологическим свойствам к технологии строительной 3D-печати.

Задачи исследования:

- 1) изучение влияния на показатели технологичности смесей для 3D-печати содержания заполнителя заданной гранулометрии и дисперсности;
- 2) определение предела наполнения цементных систем заполнителями заданной гранулометрии и дисперсности на основании экспериментальных исследований и моделирования структуры.

Методика исследований

В качестве объекта исследований рассмотрены мелкозернистые цементные системы (табл. 1), отличающиеся содержанием заполнителя (табл. 2).

Таблица 1

Характеристика сырьевых компонентов

Вид компонента	Характеристика состава	Характеристика гранулометрического состава	
		ω частиц, %	d, мм
Портландцемент	Минералогический состав: C ₃ S – 62%, C ₂ S – 13%, C ₃ A – 7,5%, C ₄ AF – 11,5%	31,9	0,05
		23	0,03
		39	0,012
		5,6	0,002
Суперпластификатор Sika®Visco Crete®20HE	Поликарбоксилатные эфиры, 100%	–	–
Кварцевый песок	SiO ₂ ~ 95%	13,2	0,63
		49,3	0,315
		37,5	0,16

Таблица 2

Характеристика состава смесей

Система	Вид заполнителя	Отношение «цемент / заполнитель (песок)»	Дозировка СП, % от массы цемента	В/Ц
П1-СП0,8	Кварцевый песок	1:1	0,8	0,28
П1,25-СП0,8		1:1,25	0,8	0,30
П1,5-СП0,8		1:5	0,8	0,30
П1,75-СП0,8		1:1,75	0,8	0,31
П2-СП0,8		1:2	0,8	0,32

В данной работе использован кварцевый песок полидисперсной гранулометрии, поскольку ранее [3] было установлено, что применение монодисперсных наполнителей и заполнителей не позволяет обеспечить необходимые в технологии 3D-печати показатели пластичности и формоустойчивости.

При оценке пластичности смеси использовался метод сдвливающей реометрии при постоянной скорости деформирования 5 мм/с (squeeze flow rheometry), детально рассмотренный в работе [12]. По результатам анализа определялся основной параметр, отвечающий за пластичность смеси при перекачивании и экструзии, – оценка предела ползучести $K_i(I)$, кПа.

Для оценки формоустойчивости использовался авторский метод сдавливающей реометрии при непрерывной скорости приложения нагрузки 0,5 Н/с [3, 5], позволяющий смоделировать непрерывное увеличение нагрузки на отдельно взятый печатный слой при укладке вышележащих слоев.

Оценка пригодности к формированию бездефектного слоя и его нагружения осуществлялась величиной показателей структурной прочности σ_0 , кПа (способность свежееотформованного образца воспринимать нагрузку без деформирования), пластической прочности $\sigma_{пл}$, кПа (способность свежееотформованного образца воспринимать нагрузку без нарушения целостности, то есть без образования трещин), относительных пластических деформаций $\Delta_{от.пл}$, мм/мм (деформации слоя при нагружении в момент образования первой трещины).

При моделировании структуры расчет объемных долей компонентов смеси был произведен на основе их массовых соотношений (см. табл. 2) в единичном объеме. Далее на основе данных о гранулометрическом составе заполнителя (см. табл. 1) рассчитывали количество частиц заданной фракции в ограниченном кубическом объеме, при этом каждая фракция была принята в виде идеальной сферы заданного диаметра, занимающей свободную позицию, не пересекая поверхности ранее размещенных частиц.

Результаты исследований

На первом этапе эксперимента определялись пластические свойства смеси, а именно способность к пластическому течению, которое определяет формирование бездефектного слоя при его экструдировании. Первый этап эксперимента соотносится с первым технологическим этапом процесса строительной 3D-печати, отличающим его от классических технологий бетонного литья.

На рис. 2 представлены экспериментальные кривые $F^* = f(h_i/R)$, полученные по результатам сдавливающего теста при постоянной скорости деформирования 5 мм/с.

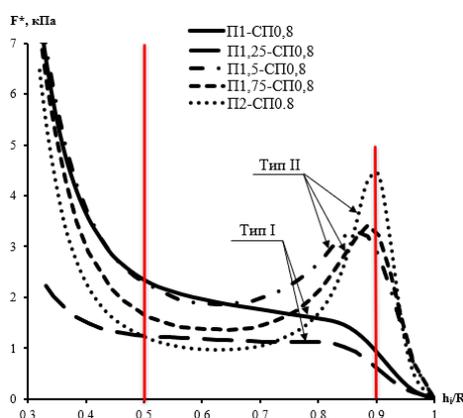


Рис. 2. Экспериментальные кривые $F^* = f(h_i/R)$ цементных смесей для 3D-печати

В результате эксперимента установлено, что изменение концентрации дисперсной фазы в системе определяет деформирование, характеризуемое двумя типами кривых $F^* = f(h_i/R)$, обоснование типизации которых представлено в работе [2].

Тип I кривых $F^* = f(h_i/R)$ соотносится со способностью смеси к пластическому течению без разрушения структуры при значениях сдавливающих напряжений нагрузки, характерных для процесса экструзии. Такие смеси обладают наилучшими показателями экструдированности именно вследствие их достаточной пластичности и способности к вязкопластическому течению без разрушения структуры.

Тип II кривых $F^* = f(h_i/R)$ отличается тем, что не имеет участка пластического деформирования в требуемом диапазоне сдавливающих напряжений. Деформирование смеси при сдавливании происходит в процессе интенсивного трещинообразования при разрушении структуры. Смеси с таким типом реологического поведения не обладают требуемыми для формирования бездефектного слоя при экструзии вследствие их высокой жесткости.

Для смесей с массовым соотношением Ц : П = 1:1 и 1:1,25 в составе смеси кривые $F^* = f(h_i/R)$ имеют участок пластического деформирования между точками перегиба $h_i/R = 0,85$ и $h_i/R = 0,5$. При этом на первом участке кривой деформирования структура сохраняет устойчивость, на участке пластического деформирования происходит течение структуры с сохранением её целостности, при прохождении второй точки перегиба происходит разрушение структуры. Величина F^* , соответствующая началу пластического течения, не превышает 3 кПа, переход в состояние течения с разрушенной структурой происходит при значениях $F^* = 3$ кПа. Для таких систем значения $Ki(I)$ находятся в диапазоне 1,0÷1,5 кПа (табл. 3).

Таблица 3

Реологические характеристики смесей

Обозначение системы	Оценка предела ползучести $Ki(I)$, кПа	Структурная прочность σ_0 , кПа	Пластическая прочность $\sigma_{пл}$, кПа	Пластические деформации $\Delta_{от.пл}$, мм/мм
П1-СП0,8	1,33	0,50	43,45	0,124
П1,25-СП0,8	1,03	5,03	31,64	0,037
П1,5-СП0,8	3,30	4,05	30,71	0,038
П1,75-СП0,8	3,42	-	-	-
П2-СП0,8	4,41	-	-	-

Для смесей с массовым соотношением Ц : П = 1:1,5, 1:1,75, 1:2 в составе смеси кривые $F^* = f(h_i/R)$ классифицируются как жесткие. В данных кривых явно выражен перегиб при величине приведенной нагрузки F^* более 3 кПа. Переход через первую точку перегиба кривой $F^* = f(h_i/R)$, характеризующий переход из устойчивого состояния вязко-пластичной смеси к деформированию, сопровождается резким падением напряжения. Это свидетельствует об интенсивном развитии трещинообразования в исследуемом образце и, соответственно, необратимом разрушении структуры дисперсной системы. Для таких систем значения предела ползучести $Ki(I)$ находятся в диапазоне 3,0÷5,0 кПа.

Таким образом, для обеспечения пластичности предел наполнения цементных систем кварцевым песком составляет не более 125% от массы вяжущего (Ц : П = 1:1,25).

На этапе безопалубочной послойной укладки обеспечение качественной бездефектной печати строительного объекта зависит от формоустойчивости смесей, то есть способности слоя смеси воспринимать нагрузку укладываемых выше слоев без трещинообразования и с минимальными деформациями слоя.

Оценка формоустойчивости при сдавливании с постоянной скоростью нагружения была выполнена для смесей при массовом соотношении Ц : П = 1:1 и 1:1,25, квалифицированных как достаточно пластичные для экструзии. Также, в качестве альтернативы, оценено реологическое поведение смесей при массовом соотношении Ц : П = 1:1,5, квалифицированных как жесткие.

На рис. 3 представлены экспериментальные кривые «пластические деформации $\Delta_{от.пл}$ – время t », «пластические деформации $\Delta_{от.пл}$ – давление F » для выбранных смесей, полученные по авторской методике сдавливающей реометрии с постоянной скоростью нагружения 0,5 Н/с.

Анализ показывает, что на всех полученных кривых выделяются три основные зоны деформирования:

- 1 – пластическое течение без нарушения структуры смеси,
- 2 – упругопластическое течение смеси до момента начала разрушения слоя,
- 3 – трещинообразование и разрушение.

Исходя из значений структурной σ_0 и пластической $\sigma_{пл}$ прочности можно утверждать, что наиболее высокой формоустойчивостью обладают системы П1,25-СП0,8 и П1,5-СП0,8 при массовом соотношении в составе смеси Ц : П = 1:1,25 и 1:1,5. Для них обеспечиваются самые высокие значения $\sigma_0 = 4,0–5,0$ кПа и $\sigma_{пл} = 30,7–31,6$ кПа при минимальных значениях пластических деформаций $\Delta_{от.пл} = 0,037–0,038$ мм/мм.

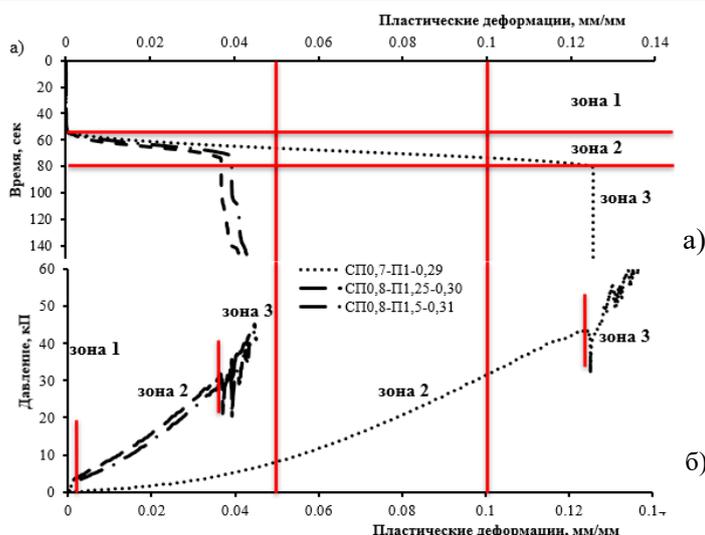


Рис. 3. Экспериментальные кривые:
а) «пластические деформации $\Delta_{от.пл.}$ – время t »;
б) «пластические деформации $\Delta_{от.пл.}$ – давление F »

Анализ результатов исследований

В соответствии с положениями структурной реологии дисперсных систем исследуемые смеси можно представить в виде двухуровневой гетерогенной системы:

- мезоуровень «цементное тесто (дисперсионная среда) + наполнитель (дисперсная фаза)»;
- микроуровень «жидкость затворения (дисперсионная среда) + зерна цемента (дисперсная фаза)».

При этом полагается, что объем, вязкость и плотность дисперсионной среды на каждом уровне определяют способность системы к пластическому течению. Содержание в структуре дисперсной фазы будут определять жесткость и формоустойчивость системы. Поэтому достижение рационального соотношения технологических показателей пластичности и формоустойчивости определяется толщиной прослойки дисперсионной среды на каждом масштабном уровне.

Расчеты и моделирование структуры дисперсной системы на мезоуровне показывают, что при увеличении массовой доли наполнителя в системе (технологического соотношения Ц : П в составе смеси) возрастает объемная доля наполнителя в единице объема смеси (рис. 4) и снижается толщина прослойки дисперсионной среды (цементного теста) (рис. 5, табл. 4).

При проведении расчетов толщина прослойки цементной пасты определялась из условия максимальной удаленности частиц друг от друга в занимаемом единичном объеме. На рис. 5 представлен типичный срез распределения частиц в единичном объеме.

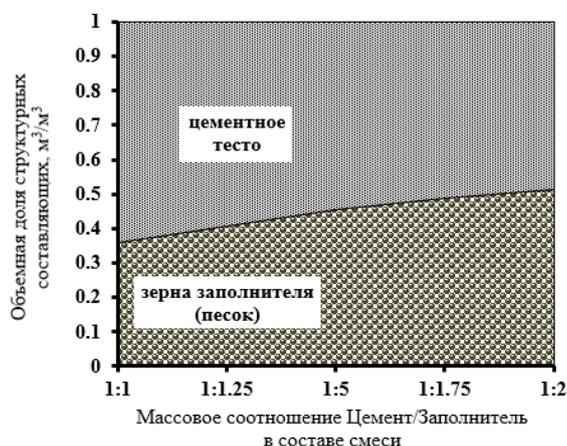


Рис. 4. Распределение объемных долей компонентов смесей

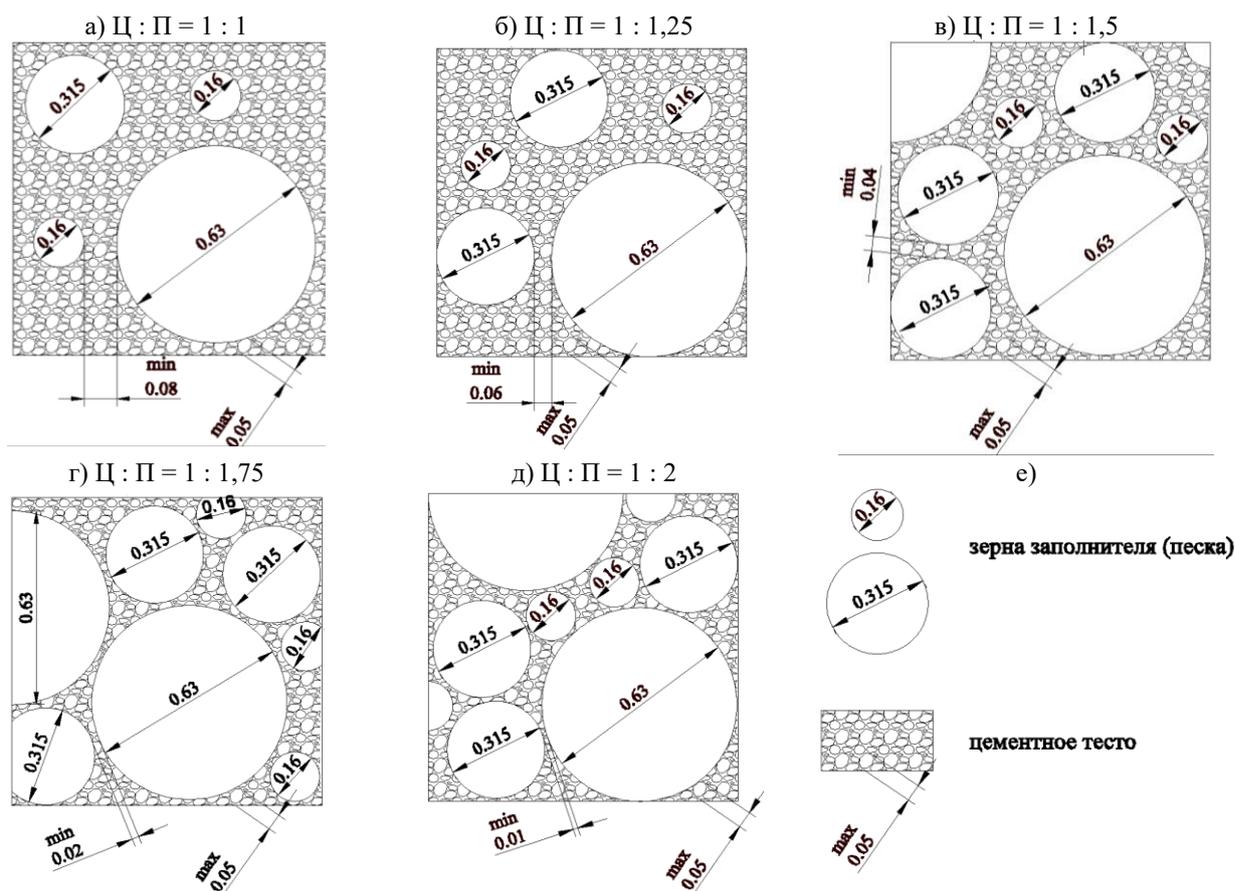


Рис. 5. Разрез элементарного объема смесей
а) П1-СП0,8; б) П1,25-СП0,8; в) П1,5-СП0,8; г) П1,75-СП0,8; д) П2-СП0,8;
е) условные обозначения

Таблица 4

**Результаты расчетов структурных характеристик дисперсной системы
 «цементное тесто (дисперсионная среда) + наполнитель (дисперсная фаза)»**

Система	Массовое соотношение «цемент: наполнитель» в составе смеси	Количество частиц наполнителя в 1 мм ³ иа метром, мм			Объемная доля наполнителя, мм ³	Объемная доля цементного теста, мм ³	Толщина прослойки между зернами наполнителя, мм	
		0,63	0,315	0,16			max	min
П1-СП0,8	1:1	1,5	5,5	4	0,35	0,65	0,08	0,30
П1,25-СП0,8	1:1,25	2	7	5	0,40	0,59	0,06	0,27
П1,5-СП0,8	1:5	2,25	8,5	6	0,45	0,55	0,04	0,25
П1,75-СП0,8	1:1,75	2,5	9	7	0,49	0,51	0,02	0,22
П2-СП0,8	1:2	3	11	8	0,52	0,48	0,01	0,20

Анализ результатов расчетов и моделей структуры двухуровневой гетерогенной системы позволяет заключить следующее. При объемной доле наполнителя менее 0,40 мм³/мм³ (Ц : П < 1 : 1,5) минимальные значения толщины прослойки цементного теста больше 0,06 мм, что превышает размер наиболее крупных зерен цемента. Поэтому цементное тесто можно рассматривать как условно однородную дисперсионную среду, пластичность которой определяет тип реологического поведения цементно-песчаной гетерогенной системы в целом.

Увеличение относительной объемной доли наполнителя до 0,45 мм³/мм³ (соотношение Ц : П = 1 : 1,5) приводит к снижению минимальных значений толщины прослойки дисперсионной фазы (цементного теста) до 0,04 мм, что меньше диаметра наиболее крупных зерен цемента.

В этом случае цементное тесто уже нельзя квалифицировать как условно однородную дисперсионную среду, а необходимо рассматривать как подсистему «жидкость затворения (дисперсионная среда) + зерна цемента (дисперсная фаза)».

В результате тип реологического поведения будет определяться содержанием, вязкостью и плотностью жидкости затворения, частицы цемента уже следует отнести к дисперсионной фазе системы. В балансе сил, определяющих реологическое поведение систем, возрастает вклад сил механического зацепления. Это и объясняет полученные в экспериментах эффекты резкого снижения пластичности смесей с $\Pi : \Pi \geq 1:1,5$.

На основании сопоставления результатов экспериментов и моделирования структуры, можно предположить, что критериальной структурной характеристикой, определяющей тип реологического поведения смесей для 3D-печати как неоднородных гетерогенных дисперсионных систем, является толщина прослойки дисперсионной среды. Определение ее значений для систем, различающихся по гранулометрии и дисперсности наполнителей, будет основой для проектирования составов смесей с заданными характеристиками пластичности и формоустойчивости. В этом и состоит направление развития исследований.

Заключение

1. По результатам экспериментальных исследований реологического поведения цементно-песчаных смесей для 3D-печати установлено, что фактор изменения массовой доли наполнителей в составе смеси является приоритетным фактором регулирования ее вязко-пластических свойств. Для обеспечения пластичности предел наполнения цементных систем кварцевым песком составляет не более 125% от массы вяжущего. Одновременно наиболее высокой формоустойчивостью обладают системы с содержанием песка 125–150% от массы цемента. Для них обеспечиваются самые высокие значения структурной $\sigma_0 = 4,0\text{--}5,0$ кПа пластической и $\sigma_{пл} = 30,7\text{--}31,6$ кПа при минимальных значениях пластических деформаций $\Delta_{от,пл} = 0,037\text{--}0,038$ мм/мм. Рациональным следует признать состав смеси с содержанием песка 125% от массы цемента.

2. На основании расчетов и моделирования структуры показано, что увеличение массового содержания наполнителя (кварцевого песка) до значений более 125% от массы вяжущего приводит к снижению минимальных значений толщины прослойки цементного теста между его зернами до 0,04 мм, что меньше диаметра наиболее крупных зерен цемента. В результате в балансе сил, определяющих реологическое поведение систем, возрастает вклад сил механического зацепления. Это и объясняет полученные в экспериментах эффекты резкого снижения пластичности смесей с $\Pi : \Pi \geq 1 : 1,5$. Поэтому предложено толщину прослойки дисперсионной среды рассматривать в качестве критериальной структурной характеристики, определяющей тип реологического поведения смесей для 3D-печати как неоднородных гетерогенных дисперсионных систем.

3. Развитие исследований связывается с формированием подходов к проектированию составов смесей для 3D-печати с заданными характеристиками пластичности и формоустойчивости. В качестве основного параметра проектирования может быть предложен показатель толщины прослойки дисперсионной среды, определяемый в зависимости от гранулометрии и дисперсности наполнителей.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С., Зыкова В.В., Карпеня А.Н., Ким А.А., Финашенков Е.А. 3D-печать в строительстве // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 1(52). С. 27–46. doi:10.18720/CUBS.52.3

2. Славчева Г.С., Артамонова О.В. Управление реологическим поведением смесей для строительной 3D-печати: экспериментальная оценка возможностей арсенала «нано» // Нанотехнологии в строительстве. 2019. Т. 1., № 3. С. 325–334. doi:10.15828/2075-8545-2019-11-3-325–334
3. Славчева Г.С., Ибряева А.И. Влияние концентрации и гранулометрии наполнителей на реологические свойства цементных систем // Вестник Тверского государственного технического университета. Сер.: Строительство. Электротехника и химические технологии. 2019. № 2 (2). С. 29–36.
4. Урьев Н.Б. Физико-химическая динамика структурированных нанодисперсных систем и нанодисперсных композиционных материалов. Часть 1 // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2010. Т. 46. № 1. С. 3–23.
5. Шведова М.А., Славчева Г.С., Артамонова О.В. Влияние добавок модификаторов вязкости на реологическое поведение цементных систем для 3D-печати // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2020. № 3(44). С. 129–138.
6. Bing Lu, Yiwei Weng, Mingyang Li, Ye Qian, Kah Fai Leong, Ming Jen Tan, Shunzhi Qian. A systematical review of 3D printable cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 2019;207:477–490. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144
7. Jayathilakage R., Rajeev P., Sanjayan J.G. Yield stress criteria to assess the buildability of 3D concrete printing. *Construction and Building Materials*. 2020;240:117989. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117989
8. Mechtcherine V., Bos F.P., Perrot A., Leal da Silva W.R., Nerella V.N., Fataei S., Wolfs R.J.M., Sonebi M., Roussel N. Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials –Production steps, processes, and their underlying physics: a review. *Cement and Concrete Research*. 2020;132:106037. doi:10.1016/j.cemconres.2020.106037
9. Mohammad S. Khan, Florence Sanchez, Hongyu Zhou. 3-D printing of concrete: Beyond horizons. *Cement and Concrete Research*. 2020;133:106070. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106070>
10. Rehman A.U.; Kim J.H. 3D Concrete Printing: A Systematic Review of Rheology, Mix Designs, Mechanical, Microstructural, and Durability Characteristics. *Materials* 2021;14:3800. doi:10.3390/ma14143800
11. Roussel N. Rheological requirements for printable concretes. *Cement and Concrete Research*. 2018;112:76–85. doi:10.1016/j.cemconres.2018.04.005
12. Roussel N., Lanos C. Plastic Fluid Flow Parameters Identification Using a Simple Squeezing Test. *Applied Rheology*. 2003;13:132–141. doi:10.1515/arh-2003-0009
13. Zhang Y., Zhang Y., She W., Yang L., Liu G., Yang Y. Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. *Construction and Building Materials*. 2019;201:278–285. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.061

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2021. N 4/49

Building Materials and Products

www.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-4/56-65>

Britvina E., Slavcheva G.

EKATERINA A. BRITVINA, Postgraduate Student, sos71@list.ru,

<https://orcid.org/0000-0002-0462-4991>

GALINA S. SLAVCHEVA, Doctor of Engineering Sciences, Professor, gslavcheva@yandex.ru,

<https://orcid.org/0000-0001-8800-2657>

Department of Technology of Building Materials, Products and Structures,

Voronezh State Technical University

Voronezh, Russia

Indicators of buildability of 3D-printable mixture: modeling and experimental research

Abstract: The results of experimental studies of the rheological behavior of 3D-printable mixture are presented. The squeezing tests were used to evaluate the rheological behaviour. To evaluate the plasticity, which

characterizes the ability of 3D-printable mixtures to maintain aggregate stability during the extrusion process, the squeezing test with a constant deformation rate was used. To evaluate the form stability the squeezing test with a constant loading speed was used. As a result, the structural and plastic strength, plastic deformations of the fresh mixture were estimated as criteria of their ability to maintain shape under compressive pressure during the printing process. It was obtained the influence of the sand content on the plasticity and shape stability of cement mixtures. The rational content of sand in the mixture composition has been determined according to the criteria values of plasticity, structural strength, and deformability under load. It is shown that the regulation of the visco-plastic properties of 3D-printable cement mixture is based on a change in the filler content that is determined by the thickness of the cement paste interlayer as a conditionally homogeneous dispersion medium. The cement paste interlayer was proposed as a criterion structural characteristic that determines the rheological behaviour of a 3D-printable mixture.

Keywords: 3D-printing, fresh mixture, rheology, plasticity, shape stability, modeling

For citation: Britvina E., Slavcheva G. Indicators of buildability of 3D-printable mixture: modeling and experimental research. FEFU: School of Engineering Bulletin. 2021;(49):56-65. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-4/56-65>

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Vatin N., Chumadova L., Goncharov I., Zykova V., Karpenya A., Kim A., Finashenkov E. 3D printing in construction. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2017;1(52):47–46. doi:10.18720/CUBS.52.3
2. Slavcheva G.S., Artamonova O.V. The control of rheological behaviour for 3D-printable building mixtures: experimental evaluation of «nano» tools prospects. *Nanotechnologies in Construction*. 2019;11(3):325–334. doi:10.15828/2075-8545-2019-11-3-325-334
3. Slavcheva G.S., Ibryaeva A.I. Effect of concentration and filler's granulometry for rheological properties cement paste. *Vestnik of Tver State Technical University. Ser.: Building. Electrical engineering and chemical technology*. 2019;2(2):29–36.
4. Uriev N.B. Physicochemical dynamics of structured nanodisperse systems and nanodisperses composite materials. Part 1. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2010;46(1):3–23.
5. Shvedova M., Slavcheva G., Artamonova O. Effect of viscosity modifier additives on the rheological behavior of 3D-printable cement paste. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2020;3(44):129–138.
6. Bing Lu, Yiwei Weng, Mingyang Li, Ye Qian, Kah Fai Leong, Ming Jen Tan, Shunzhi Qian. A systematical review of 3D printable cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 2019;207:477–490. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144
7. Jayathilakage R., Rajeev P., Sanjayan J.G. Yield stress criteria to assess the buildability of 3D concrete printing. *Construction and Building Materials*. 2020;240:117989. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117989
8. Mechtcherine V., Bos F.P., Perrot A., Leal da Silva W.R., Nerella V.N., Fataei S., Wolfs R.J.M., Sonebi M., Roussel N. Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials –Production steps, processes, and their underlying physics: a review. *Cement and Concrete Research*. 2020;132:106037. doi:10.1016/j.cemconres.2020.106037
9. Mohammad S. Khan, Florence Sanchez, Hongyu Zhou. 3-D printing of concrete: Beyond horizons. *Cement and Concrete Research*. 2020;133:106070. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106070>
10. Rehman A.U.; Kim J.H. 3D Concrete Printing: A Systematic Review of Rheology, Mix Designs, Mechanical, Microstructural, and Durability Characteristics. *Materials* 2021;14:3800. doi:10.3390/ma14143800
11. Roussel N. Rheological requirements for printable concretes. *Cement and Concrete Research*. 2018;112:76–85. doi:10.1016/j.cemconres.2018.04.005
12. Roussel N., Lanos C. Plastic Fluid Flow Parameters Identification Using a Simple Squeezing Test. *Applied Rheology*. 2003;13:132–141. doi:10.1515/arh-2003-0009
13. Zhang Y., Zhang Y., She W., Yang L., Liu G., Yang Y. Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. *Construction and Building Materials*. 2019;201:278–285. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.061