УДК 691.32; 628.4

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

И. В. ЛИЗОГУБ, П. А. МАКАРЕВИЧ, А. С. МАНН
Брестский государственный технический университет
Брест, Беларусь

Строительная 3D-печать требует бетонных смесей, реологическое состояние которых изменяется во времени и одновременно обеспечивает транспортирование, экструзию, формоустойчивость слоев и набор прочности. Поэтому технологическая пригодность смеси определяется не только удобоукладываемостью, но и динамическим и статическим пределами текучести, пластической вязкостью, тиксотропным восстановлением и скоростью структурообразования [1].

Цель работы – обосновать подход к оптимизации этих характеристик при совместном применении золы-уноса и метакаолина.

Повышенное содержание тонкодисперсной вяжущей составляющей, необходимое для когезии и ранней устойчивости слоя, увеличивает клинкероемкость печатных составов. Перспективным является совместное применение золы-уноса (ЗУ) и метакаолина (МК). Сферические частицы ЗУ снижают межчастичное трение и улучшают упаковку, однако пуццолановая активность развивается сравнительно медленно. МК благодаря высокой удельной поверхности и реакционной способности ускоряет раннее структурообразование, но повышает водопотребность и сопротивление течению. Возможность совместного регулирования свежих и ранних свойств таких систем подтверждается исследованиями материалов для 3D-печати [1, 2].

Синергетическое действие ЗУ и МК обусловлено различиями в морфологии, дисперсности и кинетике пуццолановой реакции. Оно проявляется в уплотнении упаковки частиц, изменении площади смачиваемой поверхности и межчастичного трения, связывании $Ca(OH)_2$, формировании гидратных фаз и поровой структуры. По данным [3], при суммарном замещении цемента 30 % наибольшая 28-суточная прочность при сжатии, равная 55,07 МПа, получена при соотношении ЗУ/МК = 1/2 [3]. Комбинация 10 % ЗУ и 7,5 % нано-МК также способствовала повышению прочности и снижению хлоридной проницаемости [4]. Эффективное соотношение компонентов зависит от характеристик сырья и рецептуры, а совместный эффект не является простым суммированием их свойств [3, 4].

Для 3D-печати принципиальное значение имеет реологическое окно – временной интервал, в котором смесь сохраняет транспортируемость и экструдируемость, но после укладки быстро восстанавливает структуру и сопротивляется деформации. Его границы определяются соотношением МК/ЗУ, водоцементным отношением, концентрацией твердой фазы, дозировкой суперпластификатора и временем. ЗУ способствует сохранению подвижности, тогда как МК повышает водоудержание, структурную связность и скорость раннего

структурообразования; их рациональное сочетание позволяет согласовать открытое время и формоустойчивость [1, 2]. Оптимизация должна учитывать не отдельное значение показателя, а изменение свойств от перемешивания до укладки последующего слоя: избыточная подвижность приводит к потере геометрии, а слишком быстрое структурирование затрудняет подачу смеси и межслойное сцепление.

Формирование свойств затвердевшего материала связано с переходом от обратимых межчастичных связей к продуктам гидратации. ЗУ и МК изменяют содержание свободной воды, фазовый состав и связность пор, создавая предпосылки для повышения прочности и снижения проницаемости. Вместе с тем результаты, полученные для традиционно формованных материалов, нельзя непосредственно переносить на 3D-печатные элементы, поскольку их свойства дополнительно зависят от параметров печати, анизотропии и состояния межслойных границ [1, 4]. Поэтому оценка оптимального состава должна объединять реологические, физико-механические и структурные критерии.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что совместное применение ЗУ и МК при рациональном соотношении является обоснованным направлением оптимизации составов для строительной 3D-печати. Морфологический эффект ЗУ способен частично компенсировать повышение водопотребности и сопротивления течению, обусловленное введением МК, тогда как высокая реакционная способность МК компенсирует замедленное раннее структурообразование зольной составляющей. Взаимодополняющее действие компонентов создает предпосылки для согласованного сочетания экструдируемости, открытого времени и формоустойчивости, а также для целенаправленного регулирования кинетики гидратации, поровой структуры и физико-механических свойств материала.

Исследование осуществлено в рамках задания Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (*БРФФИ*) *на выполнение научно-исследовательской работы* (*№ Т26Б-008*).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Effect of Metakaolin, Fly Ash and Polypropylene Fibres on Fresh and Rheological Properties of 3D Printing Based Cement Materials / M. Dedenis, M. Sonebi, S. Amziane [et al.] // Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. – 2020. – Vol. 28. – P. 206–215.

2. Hybrid Materials Based on Fly Ash, Metakaolin, and Cement for 3D Printing / J. Marczyk, C. Ziejewska, S. Gadek [et al.] // Materials. – 2021. – Vol. 14. – Art. 6874.

3. Modulation of the workability and Ca/Si/Al ratio of cement-metakaolin cementitious material system by using fly ash: Synergistic effect and hydration products / S. Wang, X. Gu, J. Liu [et al.] // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 404. – Art. 133300.

4. Mechanical strength and durability analysis of mortars prepared with fly ash and nano-metakaolin / R. Garg, R. Garg, N. O. Eddy [et al.] // Case Studies in Construction Materials. – 2023. – Vol. 18. – Art. e01796.