

УДК 691.3

САМОУПЛОТНЯЮЩИЕСЯ БЕТОНЫ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ*А.С. Мицкевич, Ю.Ю. Курятников**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Мицкевич А.С., Курятников Ю.Ю., 2023

Аннотация. В статье представлены результаты разработки самоуплотняющихся бетонов (СУБ) для изготовления малых архитектурных форм (МАФ). Отмечено, что при организации производства МАФ из-за небольших размеров, тонких стенок и сложной геометрической формы изделий применение традиционных бетонных смесей с крупным заполнителем затруднительно, поэтому в заводских условиях для изготовления МАФ целесообразно применять безвибрационную технологию из высокоподвижных самоуплотняющихся смесей, а в качестве минерального сырья использовать техногенные отходы (мелкий и крупный заполнители из бетонного лома) для снижения себестоимости.

Ключевые слова: самоуплотняющийся бетон, бетонный лом, техногенные отходы, молотый доменный шлак, модификаторы.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-4-17-23**ВВЕДЕНИЕ**

В последнее время в строительной отрасли все больше внимания уделяется энерго- и ресурсоэффективным материалам. В современном строительстве зданий и сооружений все шире используются высокотехнологичные бетонные смеси, способные без применения какого-либо внешнего механического воздействия самостоятельно заполнять опалубку, в том числе густоармированную, либо со сложной геометрической формой, сохраняя при этом связность и однородность [1].

Применение самоуплотняющегося бетона (СУБ) обеспечивает экономию затрат, позволяет отказаться от использования специального оборудования для уплотнения смеси, повышает скорость производства работ [2]. Самоуплотняющийся бетон – высокотехнологичный материал, свойства которого в значительно большей степени, чем характеристики обычного бетона, связаны со свойствами и точностью дозировки материалов, применяемых для его изготовления [3].

Несмотря на имеющиеся разработки отечественных ученых, комплексной зависимости «состав – структура – свойства» для СУБ на настоящее время еще не разработано. Структурные параметры бетона, такие как объемная концентрация цементного теста, истинное водоцементное отношение $V/C_{ис}$ и водопотребность наполнителей, заполнителей и минеральных добавок, являются универсальными величинами для оценки и регулирования свойств и структуры бетона в процессе производства [4]. Установка таких зависимостей – актуальное научное направление в теории проектирования СУБ. По причине высокого расхода цемента, минеральных добавок и значительного объемного содержания растворной составляющей в смеси СУБ обладают пониженным модулем упругости и повышенными деформациями усадки по сравнению с бетонами из жестких смесей и смесей с подвижностью П1–П4 [5]. Кроме этих

недостатков, стоит отметить, что высокая стоимость и большие расходы дорогих компонентов смеси приводят к значительному удорожанию 1 м^3 смеси низких и средних классов по прочности.

Высокая стоимость СУБ обусловлена существенным расходом портландцемента, поэтому многие научные работы посвящены поиску методов сокращения расхода вяжущего без потери свойств СУБ. При проектировании СУБ важно ориентироваться на местные сырьевые компоненты в качестве крупных и мелких заполнителей, а также активные и инертные минеральные добавки с целью снижения удельной стоимости кубометра бетона. Для снижения стоимости компонентов СУБ целесообразно использовать минеральные добавки из отходов промышленности. Основными применяемыми активными минеральными добавками техногенного происхождения являются зола-унос ТЭС и молотый доменный гранулированный шлак [5].

Проблема утилизации отходов промышленности и их использования в качестве сырья для производства строительных материалов актуальна не только за рубежом, но и в нашей стране. Это в первую очередь связано с улучшением экологической ситуации и сокращением территории хранения отходов. В современном мире использование вторичных заполнителей в качестве замены природным стало частой практикой, поскольку это позволяет экономить природные ресурсы, сокращает потребление энергии и уменьшает количество отходов, отправляемых на полигоны [6, 7].

Доменный гранулированный шлак всегда рассматривался в качестве одной из наиболее перспективных минеральных добавок, способных заменить часть клинкера в цементе без значительного снижения его характеристик. За счет такой замены в различные периоды развития строительной индустрии решались задачи снижения дефицита цемента и себестоимости его производства, повышения стойкости к сульфатной коррозии и эффективности тепловой обработки бетона, снижения ресурсоемкости производства и выбросов CO_2 в атмосферу [8]. Введение шлака в состав СУБ может снижать его морозостойкость и прочность, особенно в раннем возрасте, но при этом шлак повышает коррозионную стойкость, а также улучшает другие характеристики бетона. Снижение ранней прочности бетона при частичной замене портландцемента молотым доменным шлаком может быть компенсировано щелочными активаторами твердения, например Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , NaOH .

Совместно с минеральными добавками неотъемлемым компонентом СУБ является высокоэффективный поликарбоксилатный суперпластификатор. Эффективные суперпластификаторы на основе модифицированных поликарбоксилатных эфиров снижают предельное напряжение сдвига смесей, существенно повышая их текучесть, в то время как тонкодисперсные минеральные добавки (и/или модификаторы вязкости) повышают вязкость растворной части для предотвращения расслоения бетонной смеси [9]. При этом разжижающая способность суперпластификаторов весьма чувствительна к особенностям химико-минералогического состава цемента, а также минеральных добавок, что в современном бетоноведении трактуется как совместимость добавок. Так, поликарбоксилатные суперпластификаторы, как правило, плохо совместимы с высокоалюминатными цементами, снижается их эффективность в присутствии повышенного содержания щелочей, при низкой температуре окружающей среды [10].

На основании анализа литературных источников установлено, что оптимальное сочетание эффективных суперпластификаторов и высокодисперсных кремнеземсодержащих материалов техногенного происхождения (микрокремнезема,

кварцевой муки, молотого доменного шлака) позволяет направленно управлять реологическими свойствами бетонных смесей, модифицировать структуру и свойства СУБ [1, 3].

Стоимость суперпластификаторов на основе поликарбоксилатных эфиров, а также микрокремнезема остается достаточно высокой. Это обуславливает необходимость поиска решений по разработке составов полифункциональных модификаторов, основу которых составляют различные отходы промышленности, чтобы обеспечить получение бетонных смесей и бетонов с нормируемыми показателями качества [5].

Для снижения стоимости СУБ в качестве заполнителей используют вторичный щебень из бетонного лома. Однако при этом возникает проблема повышения водопотребности бетонной смеси и, как следствие, снижения прочности бетона. Решение возможно за счет активации вторичного щебня, но это направление требует дальнейших исследований [7–10].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Целью данной научно-исследовательской работы является получение СУБ для изготовления малых архитектурных форм (МАФ) с маркой по удобоукладываемости РК1 без признаков расслоения, классов по прочности В25–В30; снижение себестоимости СУБ за счет применения вторичного щебня и отечественного суперпластификатора.

В качестве вяжущего применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5Н; мелкого заполнителя – кварцевый песок с $M_k = 2,1$; крупного заполнителя – вторичный щебень фракции 5–10 мм; минеральной добавки – тонкомолотый гранулированный доменный шлак с удельной поверхностью $450 \text{ м}^2/\text{кг}$; активатора твердения – натрий серноокислый безводный; суперпластификатора – Полипласт ПК «S» (15 % сухого вещества) на основе поликарбоксилатных эфиров.

Матрица планирования и физико-механические свойства СУБ
на 7-е сутки твердения в нормальных условиях

№ п/п	Уровни факторов		Значения факторов, %		Полученные результаты		
	X_1	X_2	Молотый шлак	Полипласт ПК «S» (конц. 15 %)	В/Ц	Средняя плотность $\text{кг}/\text{м}^3$	Прочность на сжатие на 7-е сутки, МПа
1	–1	–1	20	1	0,57	2,20	28,5
2	+1	–1	30	1	0,67	2,19	26,5
3	–1	+1	20	2	0,49	2,25	35,3
4	+1	+1	30	2	0,57	2,23	29,7
5	0	0	25	1,5	0,56	2,21	29,5
6	+1	0	30	1,5	0,61	2,20	27,9
7	–1	0	20	1,5	0,62	2,21	33,4
8	0	+1	25	2	0,57	2,24	31,8
9	0	–1	25	1	0,62	2,20	27,6

Для изготовления образцов все сухие компоненты смеси дозировали согласно рецепту и перемешивали до получения однородной смеси. Затем добавляли воду до получения требуемой удобоукладываемости РК1. Далее бетонную смесь заливали в формы с размерами ячеек $10 \times 10 \times 10$ см и ставили в камеру нормального твердения. Образцы испытывали через 7 суток.

По результатам планированного эксперимента получены математические модели зависимостей В/Ц, средней плотности, предела прочности на сжатие от содержания доменного шлака и суперпластификатора. Результаты представлены в таблице и на рис. 1–4.

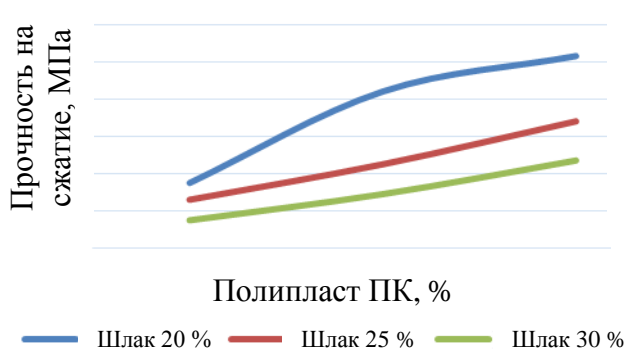


Рис. 1. Зависимость предела прочности на сжатие СУБ от содержания Полипласт ПК «S»

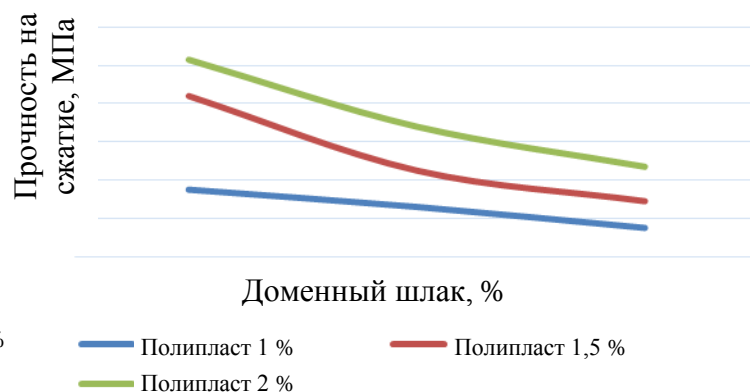


Рис. 2. Зависимость предела прочности на сжатие СУБ от содержания молотого шлака

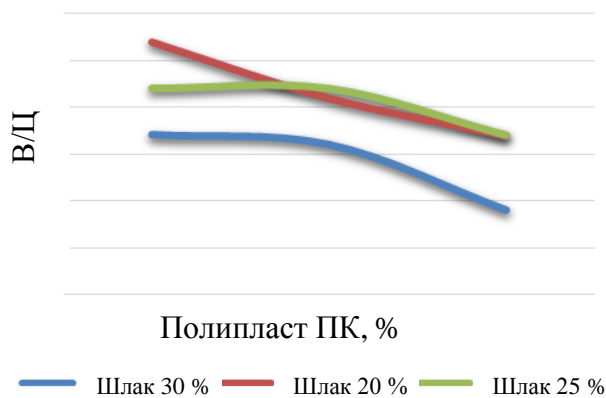


Рис. 3. Зависимость В/Ц СУБ от содержания Полипласт ПК «S»

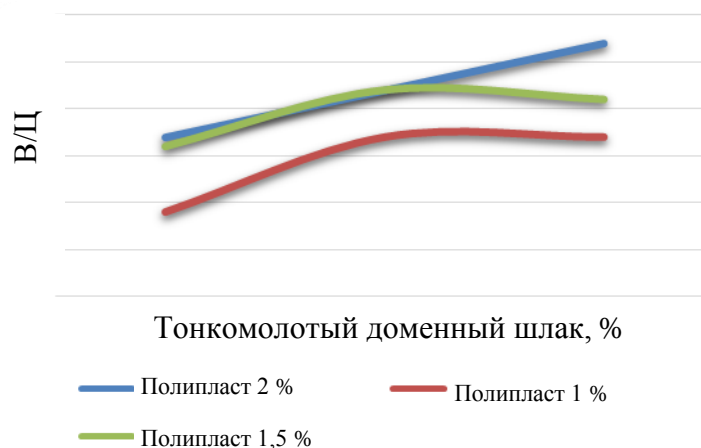


Рис. 4. Зависимость В/Ц СУБ от содержания молотого шлака

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Увеличение содержания Полипласт ПК «S» ведет к снижению В/Ц и увеличению прочности на сжатие в возрасте 7 суток. При варьировании Полипласт ПК «S» от 1 до 2 % и содержании шлака 20 % рост прочности составляет 27,8 %; содержании шлака 25 % рост прочности составляет 22,3 %, содержании шлака 30 % рост прочности составляет 10,8 %.

При увеличении процента содержания шлака в смеси рост прочности уменьшается. Оптимальное содержание Полипласт ПК «S» (с содержанием сухого вещества 15 %) составляет 1,5–2 % от массы цемента. Большой процент экономически неоправдан. Цена добавки в 2–2,5 раза ниже аналогов.

Молотый доменный шлак является наполнителем СУБ, регулирует гранулометрический состав зерновой части и реологические свойства смеси, снижает водоотделение смеси, повышает коррозионную стойкость, вводится вместо части цемента, что дает экономический эффект. Увеличение содержания молотого доменного шлака ведет к повышению В/Ц и уменьшению прочности на сжатие в возрасте 7 суток. Введение шлака менее 20 % экономически не целесообразно и не дает заметного снижения водоотделения. При варьировании шлака от 20 до 30 % прочность на сжатие уменьшается от 7 до 16 %. Компенсировать уменьшение прочности при введении шлака возможно увеличением дозировки Полипласт ПК «S».

При проектировании СУБ класса по прочности В25 считаем оптимальным следующий состав: 30 % шлака и 1,5 % Полипласт ПК «S», прочность на 7-е сутки составляет 27,9 МПа – 87,2 % от проектной. При проектировании СУБ класса по прочности В30 оптимален состав: 20 % шлака и 1,5 % Полипласт ПК «S», прочность на 7-е сутки составляет 33,4 МПа – 86,9 % от проектной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные СУБ можно использовать для изготовления МАФ: цветочницы, урны, скамьи, вазоны, что является лучшим украшением парка, сада или территории, прилегающей к дому. При организации производства МАФ из-за небольших размеров, тонких стенок и сложной геометрической формы изделий применение традиционных бетонных смесей с крупным заполнителем затруднительно. В связи с этим в заводских условиях для изготовления МАФ целесообразно применять безвибрационную технологию из высокоподвижных самоуплотняющихся смесей, а в качестве минерального сырья использовать техногенные отходы (мелкий и крупный заполнители из дробленого бетона) для снижения себестоимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванова Т.А. Колесникова Л.Г. Оценка эффективности применения бетонного лома в качестве крупного заполнителя для бетона // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 3 (87). С. 444–454.
2. Шевченко В.А. Шатрова С. А. Исследование возможности получения заполнителя для бетонов из бетонного лома // *Эпоха науки*. 2017. № 9. С. 165–168.
3. Повышение эффективности бетонов с использованием рециклингового заполнителя / О.А. Ларсен [и др.] // *Техника и технология силикатов*. 2021. Т. 26. № 2. С. 46–52.
4. Разработка составов самоуплотняющегося бетона на основе бетонного лома с использованием структурных характеристик / В.В. Наруть [и др.] // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 4. С. 8–16.
5. Наруть В.В., Ларсен О.А. Оптимизация состава самоуплотняющегося бетона на основе бетонного лома промышленных зданий // *БСТ – Бюллетень строительной техники*. 2020. № 3 (1027). С. 56–59.
6. Физико-механические особенности материалов на основе бетонного лома Д.С. Денисевич [и др.] // *Вестник евразийской науки*. 2020. № 3. С. 4–6.

7. Повышение коррозионной стойкости бетонов путем применения активных заполнителей второго типа / Н.М. Тольпина [и др.] // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2019. № 2. С. 27–32.
8. Композиционные вяжущие на основе бетонного лома / Р.В. Лесовик [и др.] // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 7. С. 8–16.
9. Магсумов А.Н., Шарипянов Н.М. Использование бетонного лома в качестве крупного заполнителя для производства бетонных смесей // *Символ науки*. 2018. № 6. С. 29–32.
10. Бедов А.И., Ткач Е.В., Пахратдинов А.А. Вопросы утилизации отходов бетонного лома для получения крупного заполнителя в производстве железобетонных изгибаемых элементов // *Вестник МГСУ*. 2016. № 5. С. 91–93.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МИЦКЕВИЧ Анастасия Сергеевна – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: anastasiamickevic85@gmail.com

КУРЯТНИКОВ Юрий Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: yuriy-k@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Мицкевич А.С., Курятников Ю.Ю. Самоуплотняющиеся бетоны на основе техногенных отходов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 4 (20). С. 17–23.

SELF-COMPACTING CONCRETE BASED ON MAN-MADE WASTE

A.S. Mitskevich, Yu.Yu. Kuryatnikov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article presents the results of the development of self-compacting concrete (SCB) for the manufacture of small architectural forms (SAF). It is noted that at the organisation of SAF production due to small sizes, thin walls and complex geometric shape of products it is difficult to use traditional concrete mixtures with coarse aggregate, therefore in factory conditions for SAF production it is expedient to use vibration-free technology of high-moving self-compacting mixtures, and as mineral raw materials to use technogenic wastes (fine and coarse aggregate from concrete scrap) to reduce the cost price.

Keywords: self-compacting concrete, concrete scrap, man-made waste, ground blast furnace slag, modifiers.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

MITSKEVICH Anastasia Sergeevna – Master's Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: anastasiamickevic85@gmail.com

KURYATNIKOV Yury Yuryevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: yuriy-k@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Mitskevich A.S., Kuryatnikov Yu.Yu. Self-compacting concrete based on man-made waste // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 4 (20), pp. 17–23.

УДК 69:006:004.9

ВОПРОСЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Ю.Н. Москвина

Тверской государственной технической университет (г. Тверь)

© Москвина Ю.Н., 2023

Аннотация. Дан краткий обзор развития технологий 3D-печати, а также указаны основные направления технического регулирования и формирования нормативно-технического режима аддитивного строительного производства.

Ключевые слова: аддитивные технологии, строительство, национальный стандарт, стандартизация.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-4-23-27

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений инновационного развития строительной отрасли является внедрение аддитивных технологий (АТ).

Активно технологии 3D-печати начали развиваться в 1980-х годах, когда для производства деталей стали применяться методы, основанные на послойном выращивании изделия по модели системы автоматизированного проектирования, в том числе так называемые методы аддитивного производства (Additive Manufacturing, АП) [1].

К началу 90-х годов XX века появился термин «3D-печать». Если раньше изделие «выращивалось» из жидкого акрила, то к тому времени оно уже изготавливалось из порошка под воздействием лазера [2]. Данный период ознаменовался активным ростом индустрии 3D-печати, основанием новых компаний и изучением новых технологий АП.

В дальнейшем технологии 3D-печати развивались по двум основным направлениям. С одной стороны, это высокотехнологичные исследования, в рамках которых создавались дорогостоящие системы 3D-принтеров, предназначенные для производства сложных деталей, а с другой – это развитие повседневного функционала 3D-принтеров, которое сделало их доступными для широкого применения [3].

Первые строительные проекты с использованием 3D-печати появились в 2014 году, а к 2023 году в мире уже было «напечатано» около тысячи объектов (от отдельных зданий