

УДК 691.32

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-7-17

Композиционное вяжущее с энергосберегающим сырьем для высокопрочного бетона

В. С. Лесовик^{*,**}, М. Ю. Елистраткин^{*}, А. С. Сальникова^{*}, Е. В. Фомина^{*,**},¹

** Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия*

*** Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, Москва, Россия*

Аннотация

В данной работе с позиции научного направления геоники «геомиметики» рассматривается вопрос повышения эффективности высокопрочного самоуплотняющегося бетона за счет использования отходов строительных материалов в виде боя керамического кирпича, лома тяжелого бетона и газосиликата. Установлено, что применение отсева дробления бетонного лома в составе сырьевой смеси способствует повышению устойчивости бетона к расслоению и водоотделению при оптимальных реологических свойствах с улучшением физико-механических свойств композиционного вяжущего и мелкозернистого бетона на его основе. Возможна экономия до 30 % портландцемента в составе композиционного вяжущего при замене на техногенное сырье. Максимальный эффект самоуплотнения сырьевой смеси проявляется в достаточной степени при использовании боя керамического кирпича. Однако, в совокупности характеристик максимальной прочности и размолосопособности предпочтительным является использование тонкомолотого лома бетона. Исследования направлены на максимальное раскрытие ресурсного потенциала техногенного сырья в виде отсевов дробления фрагментов зданий и сооружений, образующихся в следствии реновации строительного комплекса страны, а также на освобожденных территориях ЛНР и ДНР.

Ключевые слова

Композиционное вяжущее, техногенное сырье, самоуплотняющаяся смесь, гиперпластификатор, бетон.

Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет 2030» на базе Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова, за счет гранта РНФ № 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> и Правительства Белгородской области, Соглашение №3 от 24.03.2022.

¹ Для переписки

Email: fomina.katerina@mail.ru

Введение

Современное строительство — это динамично развивающаяся отрасль, активно осваивающая новые материалы и технологии. В отличие от других отраслей промышленности, промышленность строительных материалов консервативна в использовании сырья. Уже несколько столетий производство портландцемента является достаточно энергозатратным, при этом потенциал данного вяжущего полностью не раскрыт. Это связано с тем, что в большинстве случаев в затвердевшем цементном камне остается существенная доля непрогидратированных клинкерных частиц.

Реализация теоретических положений и системный подход к решению проблем, сформулированных в рамках геоники (геомиметики), позволили разработать методологические основы создания эффективных строительных композитов. Одним из практических шагов является переход на композиционные вяжущие, что позволяет повысить потенциал портландцемента, решить задачи энерго- и ресурсосбережения, решить ряд экологических задач, связанных с утилизацией и потреблением отходов горнорудной промышленности, рециркуляции отходов строительного производства, отходов, образующихся при сносе зданий и сооружений, и вовлечение их в энергоэффективные технологии строительного материаловедения [1–3].

Комбинация химических и минеральных модификаторов, а также выбор способа приготовления, дают возможность оптимизировать свойства вяжущего для решения разнообразных конкретных задач с максимальной эффективностью. Это позволяет увеличить значение основных показателей, повысить эффективность использования сырья и значительно упростить технологию за счет замены и последующего ввода нескольких составляющих

одним компонентом — композиционным вяжущим.

Также важно отметить, что такое вяжущее может выступать и в качестве готового товарного продукта, что позволяет сохранить коммерческую тайну разработанного вяжущего для конечного потребителя (строительных заводов и фирм).

Целью данного исследования является разработка композиционных вяжущих для самоуплотняющегося высокопрочного бетона с использованием отсевов дробления фрагментов зданий и сооружений с учетом научных положений геоники «геомиметики».

Материалы и методы решения задач, принятые допущения

При разработке композиционных вяжущих применяли ЦЕМ I 42,5Н и ЦЕМ II/A-II 42,5Н Новороссийского цементного завода ОАО «Новоросцемент» (пос. Верхнебаканский). В качестве заполнителя применяли кварцевый песок с остатками на ситах 0.63 мм — 14%, 0.315 мм — 45% и 0.16 мм — 41%, модуль крупности 1.49.

Композиционные вяжущие получали совместным помолом портландцемента и отсевов дробления продуктов рециклинга строительных отходов (фракций 1.25–0.14 мм) в вибрационной мельнице до удельной поверхности 500–550 м²/кг.

Для придания смесям способности к самоуплотнению применяли гиперпластификатор «МС-PowerFlow 3100 RU» производства МС-Vauchemie.

Определение физико-механических показателей осуществлялось согласно нормативной документации на образцах-кубиках с размерами ребер 10×10×10 см с учетом масштабного коэффициента ГОСТ 10180-2012.

Эффект самоуплотнения фиксировался по таким параметрам как максимальная плотность, прочность,

способности заполнять форму при равных условиях.

Основным методологическим подходом исследований является реализация теоретических положений «закон подобия» и «закон сродства структур», развиваемых в рамках научного направления геоники «геомиметики». Согласно закону подобия, все составляющие строительного композита должны иметь высокую адгезию и обладать близкими деформационными и температурными характеристиками. Эта структура имеет сходство (подобие) по основным свойствам и генезису их природным аналогам.

Результаты

При создании высокопрочного бетона важным подходом является повышение прочности готового изделия при снижении расхода портландцемента, что связано с решением экономических и экологических задач.

Согласно литературному анализу для увеличения значений прочности бетона используются методы, включающие:

- введение тонкомолотых минеральных добавок [4, 5];
- варьирование содержания мелкого заполнителя [6];
- оптимизация количества гиперпластифицирующей добавки [3].

Эти подходы реализованы в данной работе. Первоначальным этапом было получение композиционного вяжущего для самоуплотняющихся бетонов. Продукты рециклинга строительных отходов были выбраны в качестве компонента композиционного вяжущего из-за необходимости утилизации многотоннажных отходов, образующихся в следствии реновации строительного комплекса страны, а также на освобожденных территориях ЛНР и ДНР. Для исследований использовали отходы строительных материалов в виде боя керамического кирпича (КК), лома тяжелого

бетона (ТБ) и газосиликата (ГС). С позиции основных направлений геоники — закона подобия и закона сродства структур, бетонный лом содержит соединения, обладающие химической однородностью к минералам портландцемента, особенно важно присутствие негидратированного портландцемента (в количестве около 4–5 мас. %), что составляет примерно 30 мас. % от исходного портландцемента [7]. Бой газобетона содержит гидросиликаты кальция, синтезируемые в процессе автоклавной обработки при производстве изделия [2]. Можно предположить, что они могут выступать в роли кристаллических затравок, инициируя рост кристаллических новообразований. Процесс обжига керамических изделий внес минералогические изменения в фазовую структуру с образованием муллитоподобных алюмосиликатов кальция или их смесь с дисперсным кренеземсодержащим компонентом. Эти минеральные соединения могут представлять готовые центры кристаллизации при твердении композиционного вяжущего. Кроме этого, в отсевах дробления фрагментов зданий и сооружений содержится дисперсная фаза, наличие которой может способствовать повышению объема реологически активной фазы бетонной смеси. Наличие дисперсных частиц повышает стойкость к расслаиванию и водоотделению бетонной смеси, обеспечивает высокую раздвижку зерен заполнителя и снижает трение между частицами крупнодисперсных составляющих для получения максимальной текучести под действием гравитационных сил, способствуя повышению физико-механических и эксплуатационных характеристик бетона [8].

Согласно литературным данным продукты рециклинга строительных отходов обладают развитой пористостью [9] и соответственно высокой размолоспособностью

с возможностью получения удельной поверхности выше, чем у товарного портландцемента (300–400 м²/кг). В данной работе отходы предварительно дробили и проводили рассев по фракциям. Фракционированные порошки вводили в вяжущее в количестве 30 % при замене доли цемента. Для получения композиционного вяжущего проводили совместный помол портландцемента и техногенного сырья до удельной поверхности 500–550 м²/кг.

Формовали бетонные образцы с получением необходимой консистенции смеси. Для составов сырьевой смеси с тонкомолотым тяжелым бетоном В/Ц составило 0,2, а для отходов керамического кирпича и газобетона — 0,22, ввиду их несколько более высокой водопотребности.

Соотношение мелкого заполнителя к композиционному вяжущему приняли равным 1 и 1,5. Эти данные выявлены на основе литературного анализа, где в условиях указанного диапазона цементного вяжущего и заполнителя отмечаются высокие показатели прочности при сжатии бетона [9]. Такое соотношение было выбрано

исходя из возможности сохранения эффекта самоуплотнения смеси при неизменном водовязущем отношении. В качестве контрольного образца использовали состав на основе композиционного вяжущего с применением кварцевого песка КВ70(КП). Результаты испытаний представлены в таблице 1.

На следующем этапе исследования проводили на составах вяжущего с применением бетонного лома. Исследовали влияние изменения количества затворяемой воды и количества гиперпластифицирующей добавки на прочность при сжатии цементного камня. Результаты экспериментальных испытаний представлены на рисунке 1.

Завершающим этапом экспериментальных исследований было определение влияния пластифицирующей добавки на реологию сырьевых смесей с применением тонкомолотого отхода тяжелого бетона. В данном эксперименте были рассмотрены составы без использования кварцевого песка при одинаковом В/В=0,2 (рисунок 2).

Таблица 1 — Физико-механические свойства строительного композита

№	Состав			В/В	Плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа		
	Вяжущее	Вяж: Песок	ГП*, %			5 сут.	14 сут.	28 сут.
1	КВ70(КП) - контрольный	1:1	3	0.22	2463	112	106	129
2	КВ70(ГС)				2416	101	119	109
3	КВ70(КК)				2550	106	115	114
4	КВ70(ТБ)			0.2	2463	123	123	162
5	КВ70(КП) - контрольный	1:1,5		0.22	2416	70	72	110
6	КВ70 (ГС)				2385	71	74	100
7	КВ70 (КК)				2520	86	76	110
8	КВ70 (ТБ)				0.2	2430	93	85

* раствор пластификатора с концентрацией производителя

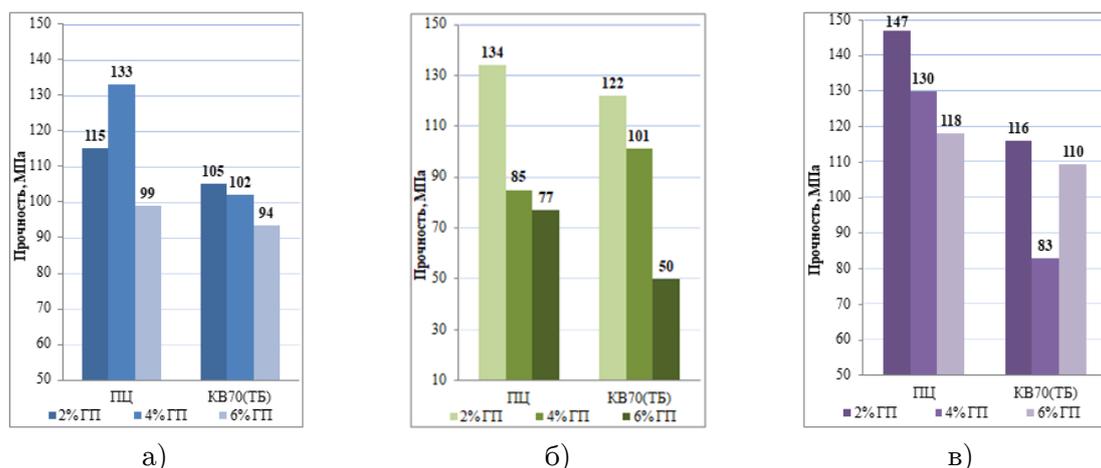


Рисунок 1 — Изменение прочности при сжатии композиционного вяжущего (состав №8, таблица 1): а) при В/В=0.17; б) при В/В=0.2; в) при В/В=0.22

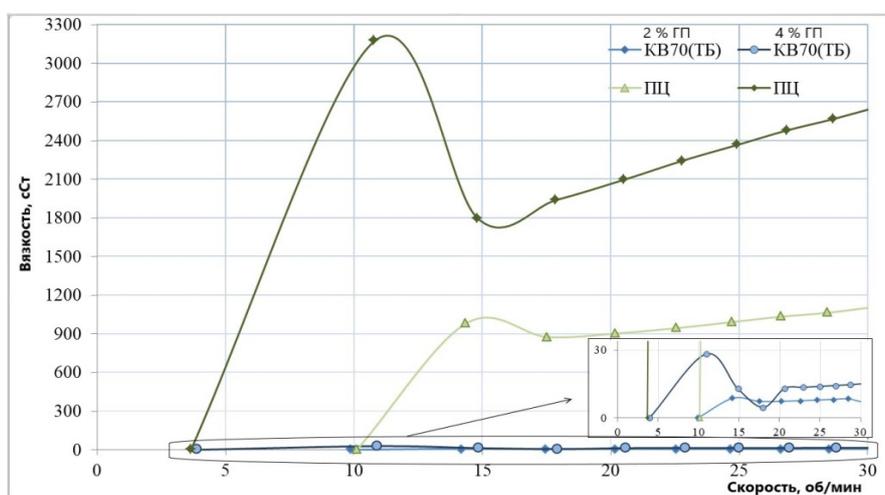


Рисунок 2 — Реограмма зависимости вязкости сырьевой смеси от времени гидратации

Обсуждение полученных результатов

Согласно экспериментальным данным (таблица 1), состав вяжущего с использованием в качестве заполнителя кварцевого песка при соотношении 1:1 является оптимальным, так как в этом случае достигается высокая прочность при сжатии образцов всех составов и на всех этапах твердения. Увеличение доли песка (1:1.5) приводит к снижению прочностных показателей у образцов, что связано с постепенным увеличением площади контакта между заполнителем и цементной матрицей.

Максимальная марочная прочность при сжатии ($R_{сж} = 162$ МПа) образцов достигается в случае соотношения

композиционное вяжущее : кварцевый песок 1:1 при использовании добавки тонкомолотого лома тяжелого бетона (рисунок 1, состав КВ70(ТБ)) и она на 26 % выше, чем контрольный состав. Увеличение прочности (123 МПа) в ранний период твердения через 5 суток обусловлено содержанием в минеральной добавке некоторого количества непрогидратированного клинкера, частицы которого вступают в реакцию с водой при гидратации уже на первых этапах твердения. Пуццолановая активность добавки способствует синтезу дополнительного количества гидросиликатных новообразований с увеличением прочности образцов на поздних стадиях твердения. Стоит отметить, что при

увеличении доли мелкого заполнителя до 1.5 при неизменном В/В, способность смеси к самоуплотнению проявляется немного хуже, чем при соотношении компонентов 1:1.

Составы на основе вяжущего с применением тонкомолотого отхода газосиликата КВ70(ГС) показали самую низкую плотность и прочность (таблица 1, состав 2, 6) в зависимости от контрольных составов (таблица 1, состав 1, 5), что объясняется большим водовязущим отношением, необходимым для достижения равноподвижной смеси. Так же наблюдалось снижение прочности на 28-й день твердения, что может служить признаком возникновения внутренних напряжений, ослабляющих прочность цементного камня. Возможно, это связано с увеличением количества сульфатов и алюминия, вносимых гипсом и газообразователем в технологии ячеистого бетона для поризации и стабилизации реологии ячеистой сырьевой смеси, что инициирует процессы, аналогичные сульфатной коррозии. В данной системе при содержании доли мелкого заполнителя 1.5, при неизменном водовязущем отношении, способность смеси к самоуплотнению резко снизилась.

Вязущие с добавлением тонкомолотого керамического кирпича КВ70(КК) при водовязущем отношении В/В = 0.22 отличаются способностью к самоуплотнению с достижением высокой плотности сырьевой смеси ($\rho = 2520, 2550 \text{ кг/м}^3$). Однако, в этих составах происходит снижение прочности в сравнении с контрольными составами (таблица 1, состав 1, 4) на 13–42%, что связано с меньшей активностью керамических частиц в процессах гидратации вяжущего. В общем случае составы с применением кварцевого песка имеют прочность на 28 суток твердения больше, чем у составов с применением техногенного сырья в виде тонкомолотого боя

газосиликата и керамического кирпича, однако применение кварцевого песка в производственных масштабах экономически не рационально ввиду его низкой размолоспособности.

Таким образом, при получения композиционных вяжущих для самоуплотняющихся смесей предпочтительно использовать минеральные добавки на основе лома тяжелого бетона или керамического кирпича. С точки зрения максимальных значений прочности, доступности и высокой размолоспособности, добавки в виде тонкомолотого лома бетона представляют научный и экономический интерес. Согласно литературному анализу [10] структура отхода на основе керамического кирпича отличается специфической пористостью и потенциально эту добавку можно рекомендовать в качестве накопителей влаги внутри бетонной структуры для поддержания гидратации и создания эффекта последовательного роста гидратных новообразований. В рамках данной работы гидратационное твердение образцов с принятым количеством воды не дало возможности проявиться данному эффекту, что требует дополнительных исследований.

При исследовании влияния количества гиперпластифицирующей добавки на прочность при сжатии цементного камня с техногенным сырьем установлено, что ее введение сверх 2% во всех случаях оказывает негативное влияние, что отмечается снижением прочности. Однако, в случае сравнения с составом на портландцементе при В/В равным 0.2, прочность КВ70(ТБ) выше на 16 %.

При анализе реологических кривых (рисунок 2) первый пик характеризует предел текучести сырьевой смеси, а угол наклона основной части реограмм отражает динамическую вязкость. Как видно из графиков (рисунок 2), с увеличением количества гиперпластификатора от 2 до

4 % происходит повышение вязкости сырьевой смеси. Следует предположить, что это обусловлено природой пластифицирующей добавки, которая отличается достаточно вязкой структурой, при введении которой вязкость сырьевой смеси увеличивается. Поэтому целесообразно ограничить верхний уровень вводимого пластификатора количеством 3 % от массы вяжущего (ориентировочно 1 % в пересчете на сухое вещество), что также подтверждается показателями прочности при сжатии образцов вяжущего (рисунок 1). Следует отметить положительный момент при формировании образцов, связанный с повышением стойкости к расслоению сырьевой смеси и отсутствием выделения воды на поверхности образцов при твердении в формах.

Таким образом оптимальным следует признать состав КВ70(ТБ) при замене 30 % портландцемента на отсев дробления тяжелого бетона с использованием 2 % гиперпластифицирующей добавки, в этом случае при водовязущем отношении $V/V = 0.2$ прочность при сжатии цементного камня составила 122 МПа, что на 16 % выше контрольного состава без использования техногенного сырья.

Заключение

При исследовании продуктов рециклинга строительных отходов в качестве компонентов композиционного вяжущего установлена эффективность использования тонкомолотого отсева дробления тяжелого бетона. С позиции «закона подобия» и «закона родства структур» бетонный лом содержит соединения непрогидратированных клинкерных частиц, которые, вступая в реакцию с водой при гидратации вяжущего, способствуют увеличению прочности композита уже на начальных этапах твердения (5 суток). Пуццолановая активность добавки интенсифицирует синтез дополнительного количества гидросиликатных новообразований с

увеличением прочности при сжатии строительного композита на 28 сутки твердения до 162 МПа, что на 26 % выше вяжущего без использования добавки.

Эффект самоуплотнения сырьевой смеси проявляется в достаточной степени при соотношении компонентов КВ70(ТБ): кварцевый песок 1:1.5 с $V/V=0.2$. У составов с применением КВ70(КК) при $V/V = 0.22$ эффект самоуплотнения незначительно снижается, а у состава с применением КВ70(ГС) он отсутствует.

Согласно реологическим показателям сырьевой смеси состава КВ70(ТБ) отмечается целесообразность ограничения верхнего уровня вводимого пластификатора «МС-PowerFlow 3100 RU» в количестве 3 % от массы вяжущего (ориентировочно 1 % в пересчете на сухое вещество) при этом достигается стойкость сырьевой смеси к расслоению и отсутствие выделения воды на поверхности образцов при твердении в формах.

Оптимальным признан состав КВ70(ТБ) при замене 30 % портландцемента на отсев дробления тяжелого бетона с использованием 2 % гиперпластифицирующей добавки, в этом случае при снижении водовязущего отношения до 0.2 прочность при сжатии цементного камня составила 122 МПа, что на 16 % выше состава на портландцементе.

Таким образом при разработке композиционных вяжущих с отсевами дробления фрагментов зданий и сооружений возможна экономия до 30 % портландцемента при этом создаются условия максимального раскрытия его потенциала, решить задачи ресурсосбережения в строительной отрасли, а также уменьшить негативное воздействие на окружающую среду, что в комплексе реализуется за счет применения теоретических положений трансдисциплинарной науки геоника «геомиметика».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Лесовик В. С., Фомина Е. В. Новая парадигма проектирования строительных композиций для защиты среды обитания человека. *Вестник МГСУ*, 2019, т. 14, вып. 10, с. 1241–1257.

DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1241-1257

[2]. Фомина Е. В., Лесовик В. С., Фомин А.Е. и др. Повышение эффективности газобетона за счет применения отходов угледобычи. *Региональная архитектура и строительство*, 2018, № 4 (37), с. 38–47.

[3]. Лесовик В. С., Федюк Р. С., Лисейцев Ю. Л. и др. Влияние состава на свойства и строение модифицированных цементных композиций. *Строительные материалы*, 2022, № 9, С. 39–49.

DOI: 10.31659/0585-430X-2022-806-9-39-49

[4]. Тараканов О. В., Калашников В. И., Белякова Е. А., Москвин Р. Н. Самоуплотняющиеся бетоны нового поколения на основе местных сырьевых ресурсов. *Региональная архитектура и строительство*, 2014, № 2, с. 47–53.

[5]. Voitovich E. V., Ayzenshtadt A. M. Design of compositions of a composite gypsum binder with the use of nano-structured silica component: thermodynamic aspect. *Prom. Grahd. Stroit.*, 2014, Vol. 5, pp. 26–30.

[6]. Kozhukhova N. I., Shurakov I. M., Elistratkin M. Yu., Kozhukhova M. I., Alfimova N. I. Understanding the relationship between composition and rheology in alkali-activated

Лесовик Валерий Станиславович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой строительного материаловедения, изделий и конструкций, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова (Российская Федерация, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46), Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Российская Федерация, 119331, Москва, пр-т Вернадского, д. 29)

Елистраткин Михаил Юрьевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова (Российская Федерация, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46)

Сальникова Алена Сергеевна — ассистент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова (Российская Федерация, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46)

Фомина Екатерина Викторовна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова (Российская Федерация, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46), Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Российская Федерация, 119331, Москва, пр-т Вернадского, д. 29)

binders. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, 012004.

DOI: 10.1088/1742-6596/2124/1/012004

[7]. Ахмед А. А., Федюк Р. С., Лисейцев Ю. Л. и др. Использование бетонного лома Ирака в качестве наполнителя и заполнителя тяжелого и легкого бетона. *Строительные материалы и изделия*. 2020, т. 3, № 3, с. 28–39.

[8]. Федюк Р. С., Мочалов А. В. Композиционные вяжущие для бетонов повышенной ударной стойкости. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2018, № 4 (200), с. 85–91.

[9]. Шеремет А. А., Елистраткин М. Ю., Шеремет Е. О., Лесовик В. С., Шаталова С. В. Исследование физико-механических свойств крупнопористого керамзитобетона для трехслойного 3D-аддитивного строительства. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2022, № 11, с. 30–39.

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-30-39

[10]. Sverguzova S.V., Sapronova Z.A., Fomina E.V. The use of water treatment sludge containing clay with adsorbed copper and nickel ions in the production of ceramic bricks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, p. 052009.

DOI: 10.1088/1757-899X/753/5/052009

Composite binder with energy-saving raw materials for high-strength concrete

V. S. Lesovik^{*,**}, M. Yu. Elistratkin^{*}, A. S. Salnikova^{*}, E. V. Fomina^{*,**1}

** Belgorod state technological university named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russia*

*** Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, Moscow, Russia*

Abstract

In this paper, from the position of the scientific direction of geonics «geomimetics», the issue of increasing the efficiency of high-strength self-compacting concrete through the use of waste building materials in the form of ceramic brick, heavy concrete scrap and gas silicate is considered. It has been established that the use of concrete scrap crushing screening in the composition of the raw mixture contributes to the increase of the concrete's resistance to delamination and water separation at optimal rheological properties with the improvement of the physico-mechanical properties of composite binder and fine-grained concrete based on it. It is possible to save up to 30% of Portland cement as part of a composite binder when replacing it with man-made raw materials. The maximum effect of self-sealing of the raw mixture is sufficiently manifested when using a ceramic brick fight. However, in combination with the characteristics of maximum strength and grinding capacity, the use of finely ground concrete scrap is preferable. The research is aimed at maximizing the resource potential of technogenic raw materials in the form of screenings of crushing fragments of buildings and structures formed as a result of the renovation of the country's construction complex, as well as in the liberated territories of the LPR and DPR.

Keywords

Composite binder, technogenic raw materials, self-compacting mixture, hyperplasticizer, concrete.

*The work was carried out within the framework of the "Priority 2030" Program on the basis of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov using the equipment of the High Technology Center of the V.G. Shukhov BSTU;
The study was supported by Russian Science Foundation (proj. 22-19-20115) <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> and the Government of the Belgorod Region, Agreement No. 3 dated March 24, 2022.*

¹ *Corresponding author*

Email: fomina.katerina@mail.ru

REFERENCES

- [1]. Lesovik V. S., Fomina E. V. Novaya paradigma proektirovaniya stroitel'nykh kompozitov dlya zashchity sredy obitaniya cheloveka [The new paradigm of designing construction composites to protect the human environment]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*. 2019, 14(10), pp. 1241–1257. (In Russ.)
DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1241-1257.
- [2]. Fomina E. V., Lesovik V. S., Fomin A. E., et al. Povyshenie jeffektivnosti gazobetona za schet primenenija othodov ugledobychi [Improving the efficiency of the concrete due to the use of waste coal]. *Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo* [Regional architecture and engineering], 2018, no 4(37), pp. 38–47.
- [3]. Lesovik V. S., Fedjuk R. S., Lisejcev Yu.L., et al. Vlijanie sostava na svojstva i stroenie modificirovannykh cementnykh kompozitov [The effect of some mineral additives on the properties of fine-aggregate concrete] *Stroitel'ny'e materialy* [Construction materials], 2022, no. 9, pp. 39–49. (In Russ.)
DOI:10.3 16659/0585-430x-2022-806-9-39-49.
- [4]. Tarakanov O. V., Kalashnikov V. I., Beljakova E. A., Moskvina R. N. Samouplotnjajushhiesja betony novogo pokolenija na osnove mestnykh syr'evykh resursov [Self-compacting concretes of a new generation based on local raw materials]. *Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo* [Reg Archit Constr], 2014, no. 2, pp. 47–53. (In Russ.)
- [5]. Voitovich E. V., Ayzenshtadt A. M. Design of compositions of a composite gypsum binder with the use of nano-structured silica component: thermodynamic aspect. *Prom. Grazhd. Stroit.*, 2014, vol. 5, pp. 26–30.
- [6]. Kozhukhova N. I., Shurakov I. M., Elistratkin M. Yu., Kozhukhova M. I., Alfimova N. I. Understanding the relationship between composition and rheology in alkali-activated binders. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, p. 012004.
DOI: 10.1088/1742-6596/2124/1/012004.
- [7]. Ahmed A. A., Fedjuk R. S., Lisejcev Ju. L., et al. Ispol'zovanie betonogo loma Iraka v kachestve napolnitelja i zapolnitelja tjazhelogo i ljogkogo betona [Use of Iraqi concrete scrap as a filler and filler of heavy and light concrete]. *Stroitel'nye materialy i izdelija* [Construction materials and products], 2020, no. 3(3), pp. 28–39. (In Russ.)
- [8]. Fedjuk R. S., Mochalov A. V. Kompozicionnye vjazhushhie dlja betonov povyshennoj udarnoj stojkosti. Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Severo-Kavkazskij region [Composite binders for concretes of increased impact resistance. News of higher educational institutions. North Caucasus region]. *Tekhnicheskie nauki* [Technical sciences], 2018, no. 4(200), pp. 85–91. (In Russ.)
- [9]. Sheremet A. A., Elistratkin M. Yu., Sheremet E. O., et al. Issledovanie fiziko-mehanicheskikh svojstv krupnoporistogo keramzitobetona dlja trehslojnogo 3D-additivnogo stroitel'stva [Investigation of physico-mechanical properties of coarse-pored expanded clay concrete for three-layer 3D additive construction]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov], 2022, No. 11, Pp. 30–39. (In Russ.)
DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-30-39.
- [10]. Sverguzova S. V., Saprionova Z. A., Fomina E.V. The use of water treatment sludge containing clay with adsorbed copper and nickel ions in the production of ceramic bricks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 052009.
DOI: 10.1088/1757-899X/753/5/052009.

Lesovik V. S. — Dr. Sc.(Eng.), Professor, Head of the Department of Construction Materials Science, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (Kostyukova st., 46, Belgorod, 308012, Russian Federation), Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation (Vernadsky Ave., 29, Moscow, 119331, Russian Federation).

Elistratkin M. Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Building Materials, Products and Structures, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (Kostyukova st., 46, Belgorod, 308012, Russian Federation).

Salnikova A. S. — Assistant, Department of Building Materials, Products and Structures, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (Kostyukova st., 46, Belgorod, 308012, Russian Federation).

Fomina E. V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Building Materials, Products and Structures, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (Kostyukova st., 46, Belgorod, 308012, Russian Federation), Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation (Vernadsky Ave., 29, Moscow, 119331, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Композиционное вяжущее с энергосберегающим сырьем для высокопрочного бетона / В. С. Лесовик, М. Ю. Елистраткин, А. С. Сальникова, Е. В. Фомина // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 2(9). С. 7–17.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-7-17

Please cite this article as:

Lesovik V. S., Elistratkin M. Yu., Salnikova A. S., Fomina E. V. Composite binder with energy-saving raw materials for high-strength concrete. Industrial processes and Technologies, 2023, vol. 3, no. 2(9), pp. 7–17.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-7-17