

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS



УДК 691.3

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-57-66>

Исследование факторов, влияющих на эффективность мелкозернистого самоуплотняющегося бетона с песком из дроблёного бетона

Л.И. Касторных , А.В. Каклюгин , М.Г. Холодняк , Д.В. Кузьменко 

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ likas9@mail.ru



EDN: NOGHXW

Аннотация

Введение. Обоснованное применение минерального сырья из строительных отходов для приготовления виброуплотняемых бетонных смесей экономически выгодно и экологически эффективно, однако влияние заполнителей из бетонного лома на реологические характеристики мелкозернистых самоуплотняющихся смесей и структуру затвердевшего бетона изучено недостаточно. Цель настоящей работы — исследование факторов, влияющих на эффективность мелкозернистого самоуплотняющегося бетона с песком из дроблёного бетона.

Материалы и методы. Для определения эффективности составов мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов готовили смеси равной удобоукладываемости марки РК1 на портландцементе ЦЕМ0 52,5Н. В качестве укрупняющего компонента в состав мелкого природного песка местных карьеров вводили песок из дроблёного бетона. Для придания смесям требуемой текучести и самоуплотняемости применяли добавку Полипласт ПК — поликарбоксилатный суперпластификатор. Оценку зернового состава мелкого заполнителя проводили по изменению модуля крупности в соответствии со стандартной методикой. Реологические и технологические характеристики самоуплотняющихся бетонных смесей устанавливали по методикам ГОСТ Р 59715-2022. Трещиностойкость мелкозернистого самоуплотняющегося бетона оценивали по коэффициенту, отражающему соотношение прочностных характеристик бетона.

Результаты исследования. В ходе исследований установлено, что при условии получения высокостабильной бетонной смеси оптимальная структура мелкозернистого бетона достигается при содержании в составе мелкого заполнителя 30 % зерен дробленого бетона и дозировке поликарбоксилатного суперпластификатора Полипласт ПК — 1 %.

Обсуждение и заключение. Обоснована техническая эффективность мелкозернистого самоуплотняющегося бетона с использованием укрупняющих зерен песка из дробленого бетона. За счет оптимизации рецептурных факторов мелкозернистого бетона с заполнителем из строительных отходов и применения безвибрационной технологии монолитных железобетонных конструкций из самоуплотняющихся смесей достигается экономический эффект.

Ключевые слова: мелкозернистые самоуплотняющиеся смеси, песок из дроблёного бетона, поликарбоксилатный суперпластификатор, стабильность бетонной смеси, трещиностойкость мелкозернистого бетона

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Касторных Л.И., Каклюгин А.В., Холодняк М.Г., Кузьменко Д.В. Исследование факторов, влияющих на эффективность мелкозернистого самоуплотняющегося бетона с песком из дроблёного бетона. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(2):57–66. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-57-66>

Investigation of the Factors Influencing the Effectiveness of Fine-Grained Self-Compacting Concrete with Crushed Concrete Sand

Lyubov I. Kastornykh , Alexander V. Kaklyugin , Mikhail G. Kholodnyak , Denis V. Kuzmenko 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ likas9@mail.ru

Abstract

Introduction. The justified use of mineral raw materials from construction waste for the preparation of vibro-compacted concrete mixtures is economically beneficial and environmentally efficient, however, the effect of aggregates from scrap concrete on the rheological characteristics of fine-grained self-compacting mixtures and the structure of hardened concrete has not been sufficiently studied. The aim of this work is to study the factors influencing the effectiveness of fine-grained self-compacting concrete with crushed concrete sand.

Materials and Methods. To determine the effectiveness of the compositions of fine-grained self-compacting concretes, mixtures of equal workability of the PK1 grade were prepared on Portland cement CEM0 52.5N. Sand from crushed concrete was introduced into the fine natural sand of local quarries as a reinforcing component. Polyplast PC, a polycarboxylate superplasticizer, was used to give the mixtures the required fluidity and self-compacting properties. The evaluation of the grain composition of the fine aggregate was carried out by changing the grain size modulus in accordance with the standard methodology. Rheological and technological characteristics of self-sealing concrete mixtures were established according to the methods of GOST R 59715-2022. Crack resistance of fine-grained self-compacting concrete was assessed by a coefficient reflecting the ratio of strength characteristics of concrete.

Results. Throughout the course of the research, it was found that, provided a highly stable concrete mixture is obtained, the optimal structure of fine-grained concrete is achieved with a content of 30% crushed concrete grains in the fine aggregate and a dosage of polycarboxylate superplasticizer Polyplast PC – 1%.

Discussion and Conclusion. The technical efficiency of fine-grained self-compacting concrete using coarsening sand grains from crushed concrete is substantiated. By optimizing the formulation factors of fine-grained concrete with aggregate from construction waste and using vibration-free technology of monolithic reinforced concrete structures made of self-compacting mixtures, an economic effect is ensured.

Keywords: fine-grained self-compacting mixtures, sand from crushed concrete, polycarboxylate superplasticizer, stability of the concrete mix, crack resistance of fine-grained concrete

Acknowledgements. The authors appreciate the reviewers, whose critical assessment of the submitted materials and suggestions helped to significantly improve the quality of this article.

For citation. Kastornykh LI, Kaklyugin AV, Kholodnyak MG, Kuzmenko DV. Investigation of Factors Influencing the Effectiveness of Fine-Grained Self-Compacting Concrete with Crushed Concrete Sand. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(2):57–66. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-57-66>

Введение. Основными факторами, определяющими техническую и экономическую эффективность виброуплотняемого бетона, являются вид, расход и качество материалов. Наиболее действенным фактором из вышеперечисленных является зерновой состав заполнителя, так как именно гранулометрия заполнителя определяет водопотребность и расход вяжущего в бетонной смеси и, следовательно, формирует её стоимость [1].

Для самоуплотняющихся бетонных смесей решающее значение имеет не только гранулометрическая характеристика заполнителя, но и форма его зерен. При выборе вида заполнителя предпочтение следует отдавать материалам с окатанной формой частиц, обеспечивающей свободное течение и самоуплотняемость смеси [2].

Использование минерального сырья из «старого» бетона для приготовления бетонных смесей обосновано нормативной документацией и многочисленными исследованиями, подтверждающими технический и экологический эффект рециклинга строительных отходов [3–6]. Для получения крупного и мелкого заполнителя из бетонного лома применяются дробильно-сортировочные установки, которые способствуют формированию обломочной весьма развитой шероховатой формы зерен заполнителя [7]. Применение такого материала для самоуплотняющихся бетонных смесей должно быть обосновано предварительными исследованиями [8–10].

Для мелкозернистых самоуплотняющихся бетонных смесей (МСУБ), применяемых для бетонирования тонкостенных и густоармированных конструкций, гранулометрическая характеристика заполнителя также играет решающую роль для обеспечения требуемой текучести. В ряде случаев для получения бетона высокой прочности

в состав мелкого заполнителя следует вводить укрупняющий компонент. В роли укрупняющей добавки для оптимизации зернового состава мелкого заполнителя традиционно используют отсеивы камнедробления природного щебня по ГОСТ 31424-2010 «Материалы строительные нерудные из отсеивов дробления плотных горных пород при производстве щебня» и продукты рециклинга строительных отходов [11–13]. Роль крупных зерен песка из дробленого бетона на формирование структуры самоуплотняющегося бетона изучена недостаточно, поэтому целью настоящей работы явилось исследование факторов, влияющих на эффективность мелкозернистого самоуплотняющегося бетона с песком из дроблёного бетона.

Материалы и методы. Для проведения исследований использовали мелкий заполнитель, в состав которого включали:

- песок природный (далее Ппр), соответствующий требованиям ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ»: истинная плотность 2650 кг/м³; насыпная плотность 1410 кг/м³; модуль крупности 1,15 (группа — очень мелкий); пустотность 46,6 %;

- песок из дроблёного бетона (далее Пдр), удовлетворяющий требованиям ГОСТ 32495-2013 «Щебень, песок и песчано-щебеночные смеси из дробленого бетона и железобетона», смеси трех фракций: 0,63–1,25 мм, 1,25–2,5 мм, 2,5–5,0 мм в соотношении по массе 20:30:50 соответственно. Оптимальное соотношение фракций песка из дробленого бетона принимали по результатам ранее проведенных исследований [14].

Мелкозернистые бетонные смеси готовили на основе бездобавочного портландцемента типа ЦЕМ0 52,5Н, удовлетворяющего требованиям ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные»: прочность на сжатие в возрасте 28 сут — 63,3 МПа; прочность на сжатие после тепловой обработки — 48,2 МПа; нормальная густота цементного теста — 27,8 %; удельная поверхность — 382,5 м²/кг; начало схватывания — 90 мин.

Для обеспечения самоуплотняемости и требуемой текучести бетонной смеси применяли суперпластификатор Полипласт ПК (далее СП ПК) на основе эфиров поликарбоксилатов. Добавка, являющаяся универсальной для товарных бетонных смесей и сборного железобетона, по рекомендациям производителя используется для регулирования сохраняемости смесей при одновременном быстром наборе ранней прочности бетона. Диапазон дозирования химического модификатора для мелкозернистых бетонных смесей установили по ранее выполненным исследованиям [15–17].

Оценку зернового состава заполнителя при добавлении укрупняющих зерен из дробленого бетона проводили по изменению модуля крупности по методике ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ».

Реологические и технологические характеристики мелкозернистых бетонных смесей устанавливали по методикам ГОСТ Р 59715-2022 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся». Оценку смеси по показателям самоуплотняемости РК и текучести Т выполняли с использованием блокировочного кольца с 16 стержнями (рис. 1).



Рис. 1. Прибор для определения самоуплотняемости и текучести бетонных смесей

Вязкость мелкозернистой смеси t_{500} определяли, фиксируя время, за которое смесь при растекании впервые коснется отметки 500-миллиметровой окружности.

Для оценки стабильности смеси (устойчивости к расслаиванию) использовали индекс VSI, определяемый визуальным методом в процессе растекаемости смеси.

Для определения физико-механических характеристик мелкозернистого самоуплотняющегося бетона из смеси каждого состава готовили контрольные образцы-кубы с номинальным размером ребра 100 мм. Изготовление, хранение и испытание образцов бетона выполняли по методике ГОСТ 10180-2012 «Бетоны».

Трещиностойкость мелкозернистого бетона оценивали по коэффициенту K_{TP} — косвенной характеристике, отражающей отношение прочности бетона при изгибе к прочности при сжатии [10, 18]:

$$K_{TP} = R_{bt}/R_b,$$

где R_{bt} — предел прочности бетона при изгибе, МПа; R_b — предел прочности бетона при сжатии, МПа.

Структурные характеристики мелкозернистого бетона оценивали по микрофотографиям среза образцов, выполненным в поляризованном свете с помощью оптического микроскопа с камерой LEVENHUK C310 (диаметр поля зрения — 18 мм; спектральный диапазон — 400–650 нм; активный диапазон — 75 dB; чувствительность — 1,5 нм; максимальное разрешение — 2048×1536).

Результаты исследования. В ходе исследований выполнен анализ гранулометрического состава мелких заполнителей при использовании песка из дробленого бетона в качестве укрупняющей добавки (таблица 1).

Таблица 1

Анализ гранулометрического состава мелких заполнителей

Вид и состав заполнителя, %	Наименование остатка	Остатки, % по массе, на ситах размером, мм					Проход через сито с сеткой N016, % по массе	Модуль крупности
		2,5	1,25	0,63	0,315	0,16		
$\frac{P_{пр}}{100}$	Частный	0,03	0,10	0,405	27,505	58,00	13,96	1,15
	Полный	0,03	0,13	0,535	28,040	86,04	100,0	
$\frac{P_{пр} + P_{др}}{80 + 20}$	Частный	8,615	5,235	3,760	23,060	44,685	14,645	1,66
	Полный	8,615	13,85	17,61	40,670	85,355	100,0	
$\frac{P_{пр} + P_{др}}{70 + 30}$	Частный	12,60	7,605	4,220	21,820	40,030	13,725	1,90
	Полный	12,60	20,205	24,425	46,245	86,275	100,0	
$\frac{P_{пр} + P_{др}}{60 + 40}$	Частный	16,81	10,16	6,420	20,775	34,900	10,935	2,20
	Полный	16,81	26,97	33,39	54,165	89,065	100,0	

Проведенные исследования показали, что природный песок местных карьеров, относящийся к группе очень мелких, в бетонных смесях способствует увеличению водопотребности и расхода цемента, следовательно, его применение возможно только после обосновывающих испытаний в бетоне. При обогащении природного песка зернами дробленого бетона в интервале от 20 до 40 % гранулометрическая характеристика заполнителя улучшается за счет увеличения количества зерен размерами 0,63–5,0 мм.

Для оценки влияния зернового состава заполнителя на основные свойства мелкозернистых самоуплотняющихся смесей и бетонов на их основе готовили смеси марки РК1 по удобоукладываемости (растекаемость конуса 55–65 см по ГОСТ Р 59714-2021 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся») при номинальном расходе цемента 510 кг/м³. В ходе определения растекаемости смеси устанавливали её вязкость, текучесть и стабильность.

В качестве факторов, влияющих на реологические и физико-механические свойства МСУБ, приняли:

– содержание зерен из дробленого бетона в природном мелком заполнителе в диапазоне от 20 до 40 % с интервалом 5 %;

– дозировку суперпластификатора СП ПК в диапазоне от 0,5 до 1,5 % массы цемента с интервалом 0,5 %.

Состав и реологические характеристики исследованных бетонных смесей приведены в таблице 2. Зависимость вязкости и текучести смесей от состава заполнителя и дозировки суперпластификатора представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

Таблица 2

Характеристики и оценка стабильности мелкозернистых бетонных смесей

Состав	Содержание П _{др} , %	Дозировка СП ПК, %	В/Ц	Вязкость, с	Текучесть, мм	Средняя плотность, кг/м ³	Визуальная характеристика смеси	Индекс стабильности VSI по ГОСТ Р 59715
1FC	20	1,0	0,49	5,3	25,0	2128	Однородная, но быстро загустевает	1 — стабильная
2FC	25	1,5	0,49	6,0	25,5	2185	На поверхности смеси светлый налёт	2 — нестабильная
3FC	25	0,5	0,69	2,0	10,5	2082	Однородная, но сразу растекается	1 — стабильная
4FC	30	1,0	0,49	6,5	26,5	2145	Однородная, хорошо течет	0 — высоко стабильная
5FC	35	1,5	0,45	4,4	17,5	2215	На поверхности смеси светлый налёт	2 — нестабильная
6FC	35	0,5	0,54	2,0	23,0	2195	Однородная, но сразу растекается	1 — стабильная
7FC	40	1,0	0,47	2,8	14,5	2208	Заметное водоотделение смеси	3 — высоко нестабильная

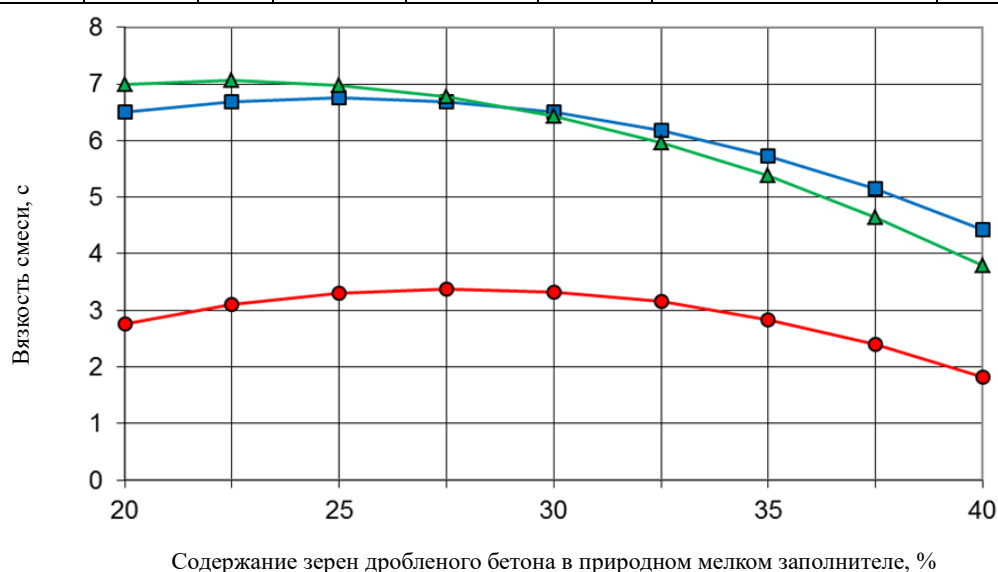


Рис. 2. Зависимость вязкости смесей от состава заполнителя и дозировки суперпластификатора: ○ — дозировка СП ПК 0,5 %; □ — дозировка СП ПК 1,0 %; Δ — дозировка СП ПК 1,5 %

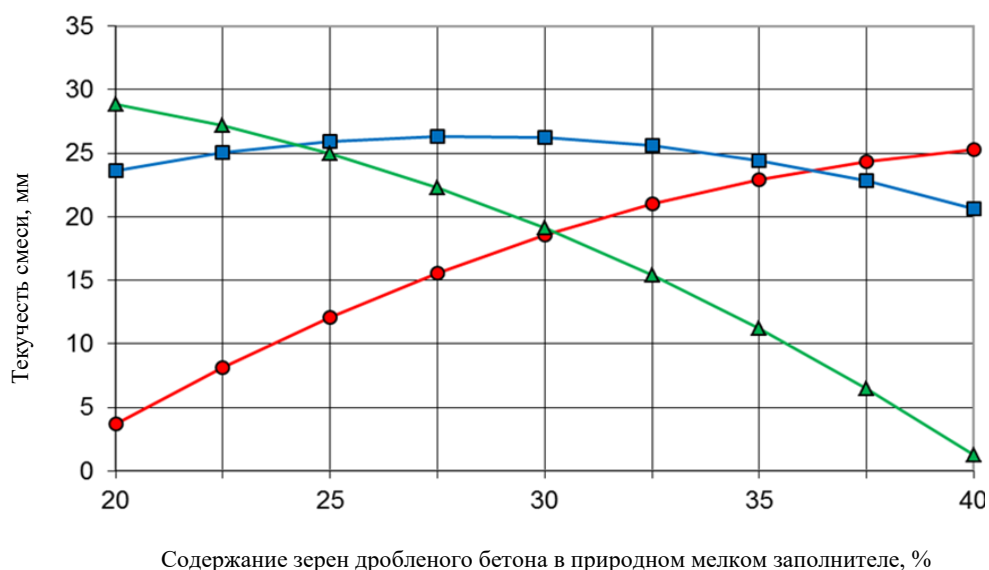


Рис. 3. Зависимость текучести смесей от состава заполнителя и дозировки суперпластификатора: ○ — дозировка СП ПК 0,5 %; □ — дозировка СП ПК 1,0 %; Δ — дозировка СП ПК 1,5 %

При проведении исследований установлено, что для получения стабильных самоуплотняющихся мелкозернистых смесей дозировку дробленого песка следует принимать не более 30 % (состав 4FC). Увеличение количества зерен с шероховатой развитой формой поверхности неизбежно приводит к расслоению смеси, а повышение дозировки суперпластификатора усиливает этот эффект, приводя к заметному водоотделению.

Анализ зависимости реологических характеристик мелкозернистых смесей от состава заполнителя и дозировки суперпластификатора показывает, что при увеличении доли крупных зерен песка из дробленого бетона вязкость смесей понижается, а текучесть изменяется неоднозначно. Повышение показателя текучести зафиксировано при увеличении расхода крупных зерен в составах с минимальной дозировкой суперпластификатора. В составах с максимальной дозировкой СП ПК, наоборот, наблюдается снижение показателя текучести смесей с увеличением доли укрупняющей добавки в составе песка. Такой характер изменения текучести смесей подтверждает значительное влияние зернового состава заполнителя на реологические свойства самоуплотняющихся смесей. Для исследованных составов высокостабильная, однородная, нерасслаивающаяся смесь получена при расходе зерен дробленого песка в составе заполнителя в количестве 30 % и дозировке СП ПК — 1,0 %.

Показатели конструктивности и физико-механические характеристики мелкозернистого самоуплотняющегося бетона исследованных составов приведены в таблице 3. Влияние состава заполнителя и дозировки суперпластификатора на прочность мелкозернистого бетона, испытанного в раннем (1 сут) и проектом (28 сут) возрасте, представлены на рис. 4.

Таблица 3

Показатели конструктивности и физико-механические характеристики МСУБ

Состав	Расход материалов на 1 м ³ , кг			Ц/В	Средняя плотность бетона, кг/м ³	Предел прочности, МПа		Коэффициент $K_{тр}$
	П _{пр}	П _{др}	СП ПК			при сжатии	при изгибе	
1FC	1093	274	5,1	2,04	2116	46,1	6,46	0,140
2FC	1052	351	7,4	2,04	2126	48,6	5,51	0,113
3FC	960	319	2,7	1,45	2068	33,1	4,30	0,129
4FC	965	414	5,1	2,04	2156	52,6	6,37	0,121
5FC	933	502	7,6	2,22	2179	55,4	6,10	0,110
6FC	907	488	2,9	1,85	2157	45,9	4,63	0,101
7FC	855	570	5,3	2,13	2182	52,6	7,08	0,135

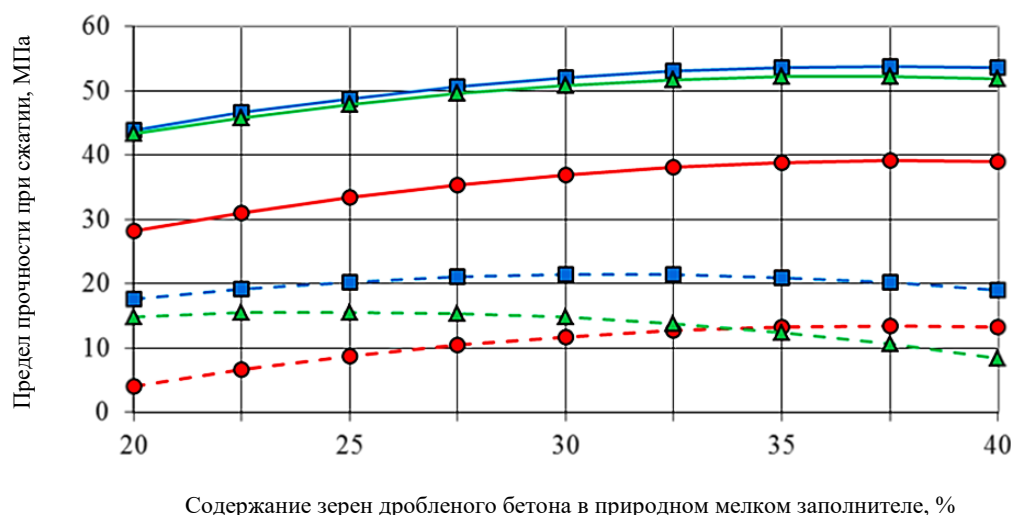


Рис. 4. Зависимость прочности мелкозернистого бетона от состава заполнителя и дозировки суперпластификатора:

- — дозировка СП ПК 0,5 %; □ — дозировка СП ПК 1,0 %; Δ — дозировка СП ПК 1,5 %;
 - - - — прочность бетона в возрасте 1 сут; — — прочность бетона в возрасте 28 сут

Анализ полученных данных свидетельствует, что на формирование начальной структурной прочности бетона влияние расхода укрупняющих зерен и дозировки суперпластификатора оказывается незначительно. Для бетонов, испытанных в проектом возрасте, установлено, что увеличение содержания крупных зерен песка из дробленого бетона в интервале от 32,5 до 40 % приводит к повышению прочности при сжатии на 25 %. При этом максимальная прочность бетона зафиксирована для составов с максимальной дозировкой суперпластификатора.

Влияние рецептурно-технологических факторов на трещиностойкость мелкозернистого самоуплотняющегося бетона показано на рис. 5. Установлено, что при увеличении содержания укрупняющих зерен дробленого песка в составе заполнителя коэффициент трещиностойкости бетона $K_{Тр}$ изменяется нелинейно. Формирование структуры мелкозернистого бетона, способной сопротивляться развитию трещин, связано с рациональным гранулометрическим составом заполнителя и оптимальным содержанием цементного камня.

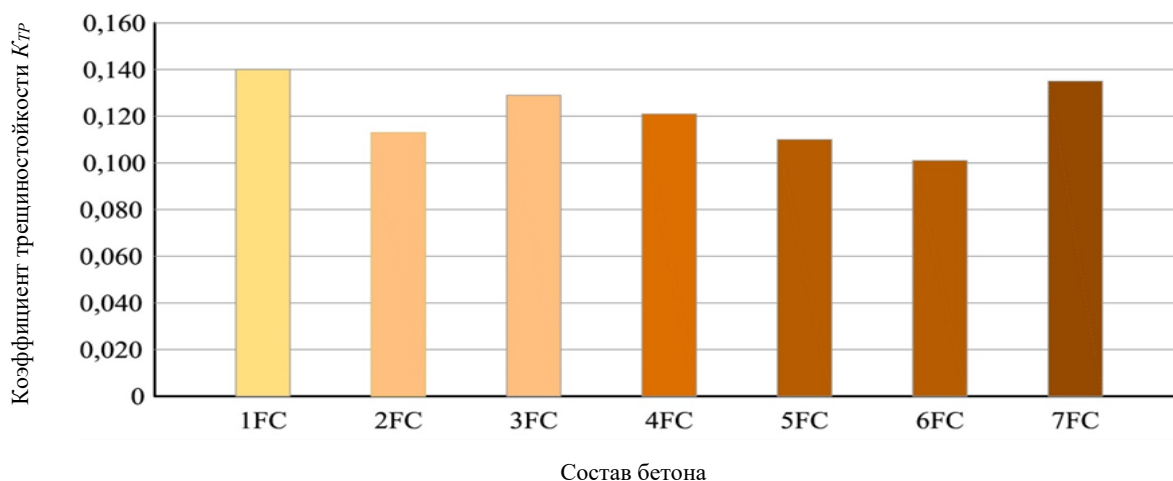


Рис. 5. Зависимость коэффициента трещиностойкости МСУБ от рецептурных факторов

На рис. 6 представлены микрофотографии среза образцов МСУБ, наглядно показывающие структуру бетона с различным содержанием укрупняющих зерен песка из дробленого бетона.

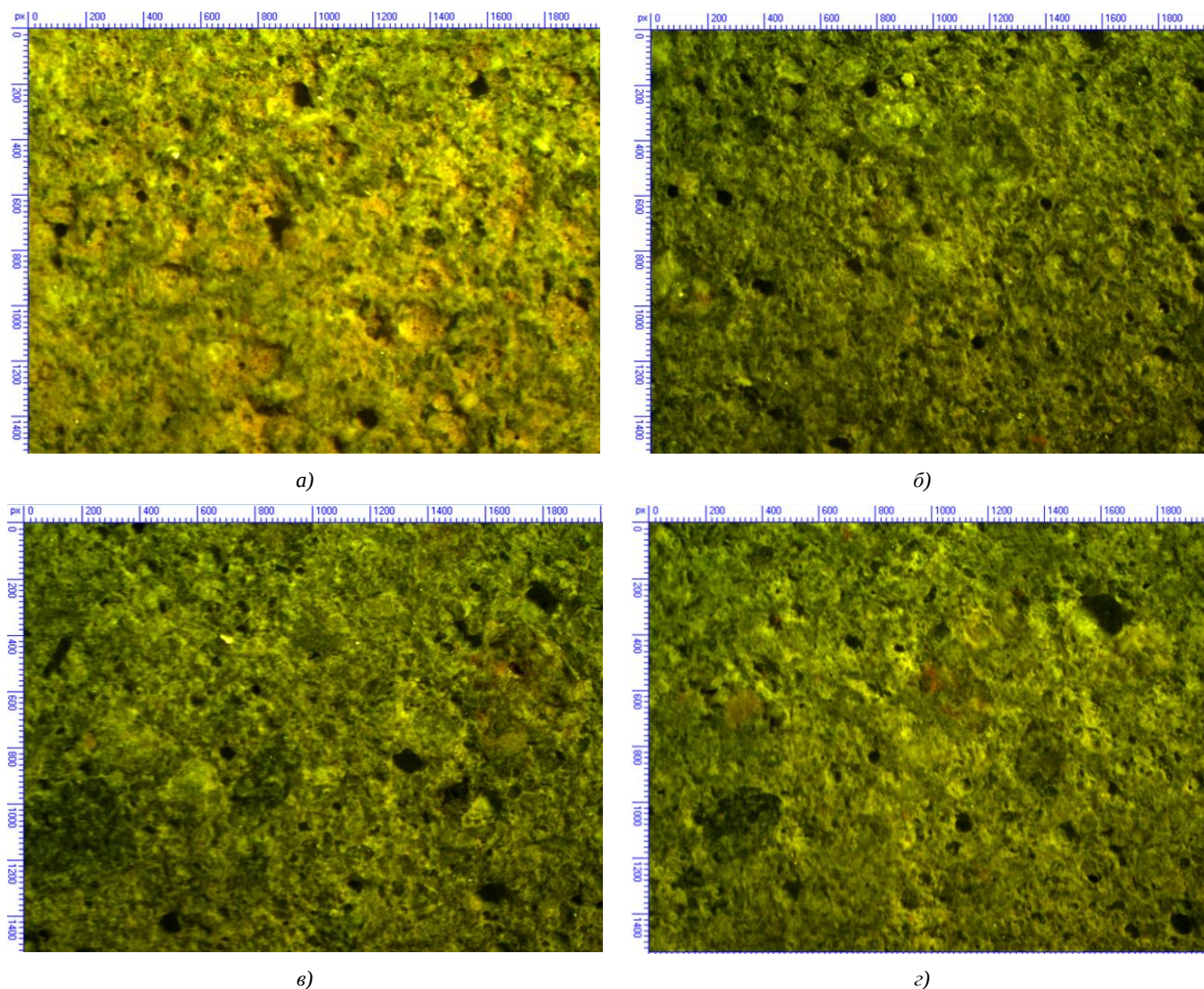


Рис. 6. Микрофотографии среза образцов МСУБ с содержанием зерен дробленого песка: а — 20 %; б — 25 %; в — 30 %; г — 40 %

В проведенных нами исследованиях установлено, что при условии получения высокостабильной смеси оптимальная структура мелкозернистого бетона достигается при содержании в составе заполнителя 30 % крупных зерен дробленого бетона и дозировке СП ПК — 1 % (состав 4FC на рис. 6 в).

Обсуждение и заключение. Выполненные исследования показали, что обогащение природного мелкого песка местных карьеров зернами размерами 0,63–5,0 мм из песка дробленого бетона в оптимальном количестве улучшает гранулометрический состав заполнителя и без потери показателей текучести смеси способствует повышению прочности бетона. Выявлено, что рецептурные факторы оказывают значительное влияние на реологические показатели мелкозернистых самоуплотняющихся смесей. Для получения стабильных смесей, характеризующихся связностью и нерасслаиваемостью, доля крупных зерен дробленого песка в составе заполнителя не должна превышать 30 %, а дозировка поликарбоксилатного суперпластификатора — 1,0 % массы цемента.

Анализ прочностных характеристик мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов с песком из дробленого бетона показал, что формирование рациональной структуры связано с рецептурой смеси и технологией её транспортирования и укладки. Применение безвибрационной бетононасосной технологии при возведении монолитных железобетонных конструкций из самоуплотняющихся смесей с песком из строительных отходов будет способствовать снижению сметной стоимости работ и улучшению экологической обстановки в Донском регионе [14, 19].

Список литературы/References

1. Баженов Ю.М., Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы. *Строительные материалы*. 2014;3:6–14. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/konstruirovaniye-struktur-sovremennykh-betonov-opredelyayushchie-printipy-i-tehnologicheskie-platformy> (дата обращения 29.03.2025).

Bazhenov YuM, Chernyshov EM, Korotkikh DN Designing of Modern Concrete Structures: Determining Principles and Technological Platforms. *Building Materials*. 2014;3:6–14. (In Russ.) <https://cyberleninka.ru/article/n/konstruirovaniye-struktur-sovremennykh-betonov-opredelyayushchie-printipy-i-tehnologicheskie-platformy> (accessed: 29.03.2025).

2. Касторных Л.И., Черепанов В.Д., Березовой В.Э. Оптимизация зернового состава заполнителя для мелкозернистого самоуплотняющегося бетона. *Молодой исследователь Дона*. 2020;5(26):40–48. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44048323> (дата обращения 29.03.2025).

3. Ларсен О.А., Наруть В.В., Воронин В.В. Технология переработки бетонного лома с целью получения самоуплотняющегося бетона. *Строительство и реконструкция*. 2020;2(88):61–66. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-88-2-61-66>

Larsen OA, Narut VV, Voronin VV Technology of Processing Concrete Scrap in Order to Obtain Self-Compacting Concrete. *Construction and Reconstruction*. 2020;2(88):61–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-88-2-61-66>

4. Булдыжов А.А., Алимов Л.А. Самоуплотняющиеся бетоны с наномодификаторами на основе техногенных отходов. *Промышленное и гражданское строительство*. 2014;8:86–88.

Buldyzhov AA, Alimov LA Self-Compacting Concretes with Nanomodifiers Based on Technogenic Waste. *Industrial and Civil Construction*. 2014;8:86–88. (In Russ.).

5. Красникова Н.М., Кириллова Е.В., Хозин В.Г. Вторичное использование бетонного лома в качестве сырьевых компонентов цементных бетонов. *Строительные материалы*. 2020;1(2):56–65. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-56-65>

Krasnikova NM, Kirillova EV, Khozin VG Recycling of Concrete Scrap as Raw Materials of Cement Concretes. *Building Materials*. 2020;1-2:56–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-56-65>

6. Kastornyykh L., Kosenko V., Kaklyugin A., Kholodnyak M., Fedorchenko A. Vibration-Free Decorative Concrete Technology is the Key to Sustainable Development of Landscape Architecture. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023;575. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2_328

7. Lopatin N.A., Motornaja A.I., Neguliaeva E.Yu. The most effective crushing equipment and testing of recycled concrete aggregates. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015;10(37):34–45. URL: [https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2015/10\(37\)/3_lopatin_37.pdf](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2015/10(37)/3_lopatin_37.pdf) (дата обращения 29.03.2025).

8. Пуляев С.М. Исследование процесса раннего структурообразования бетона на щебне из бетонного лома. *Вестник Московского государственного строительного университета*. 2012;1:68–71. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protsesta-rannego-strukturoobrazovaniya-betona-na-schebne-iz-betonnogo-loma-1> (дата обращения 29.03.2025).

Pulyaev SM Research of Early Structure Formation Process of Concrete Where Concrete Waste are Used as Crushed Stone. *Bulletin of the Moscow State University of Civil Engineering*. 2012;1:68–71. (In Russ.) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protsesta-rannego-strukturoobrazovaniya-betona-na-schebne-iz-betonnogo-loma-1> (accessed: 29.03.2025).

9. Alwaeli M., Alshawaf M. Waste Utilization in Concrete Technology as a Substitute for Natural Aggregates in the Context of Circular Economy: an Overview. *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019*. 2019;19:151–158. <https://doi.org/10.5593/sgem2019V/4.2/S05.021>
10. Kastornykh L, Kaklyugin A, Kholodnyak M, Osipchuk I. Modified Concrete Mixes for Monolithic Construction. *Materials Science Forum*. 2021;1043:81–91. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1043.81>
11. Гончарова М.А., Борков П.В., Аль-Суррайви Х.Г.Х. Рециклинг крупнотоннажных бетонных и железобетонных отходов при реализации контрактов полного жизненного цикла. *Строительные материалы*. 2019;12:52–57. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-777-12-52-57>
- Goncharova MA, Burkov PV, Al-Suraimi HGH Recycling of Large-Capacity Concrete and Reinforced Concrete Waste During the Implementation of Full-Life Cycle Contracts. *Building Materials*. 2019;12:52–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-777-12-52-57>
12. Modani PO, Mohitkar V. Self-compacting concrete with recycled aggregate: a solution for sustainable development. *International Journal of Civil Structural Engineering*. 2014;4:430–440.
13. Трищенко И.В., Касторных Л.И., Фоминых Ю.С., Гикало М.А. Оценка эффективности инвестиционного проекта реконструкции предприятий крупнопанельного домостроения. *Жилищное строительство*. 2018;10:39–44. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-investitsionnogo-proekta-rekonstruktsii-predpriyatiy-kрупнопанельного-домостроения> (дата обращения 29.03.2025).
- Trischenko IV, Kastornykh LI, Fominykh YuS, Gikalo MA Evaluation of Effectiveness of Investment Project of Reconstruction of Large-Panel Construction Enterprises. *Housing Construction*. 2018;10:39–43. (In Russ.) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-investitsionnogo-proekta-rekonstruktsii-predpriyatiy-kрупнопанельного-домостроения> (accessed: 29.03.2025).
14. Касторных Л.И., Гикало М.А., Каклюгин А.В., Серебряная И.А. Математическое моделирование технологических процессов бетонирования монолитных конструкций из мелкозернистых смесей. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2023;2(4):84–93. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-84-93>
- Kastornykh LI, Gikalo MA, Kaklyugin AV, Serebryanaya IA Mathematical Modeling the Processes of Concreting the Monolithic Structures Made of the Fine-Grained Mixes. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2023;2(4):84–93. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-84-93>
15. Smirnova OM. Compatibility of portland cement and polycarboxylate-based superplasticizers in high-strength concrete for precast constructions. *Magazine of Civil Engineering*. 2016;6:12–22. <https://doi.org/10.5862/MCE.66.2>
16. Kastornykh LI, Trischenko IV, Kaklyugin AV, Shershen DR. Heat Curing Efficiency Estimation of Concrete with Superplasticizers on Polycarboxylates Basis. *Materials Science Forum*. 2019;974:231–236. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.974.231>
17. Муртазаев С.-А.Ю., Шеина С.Г., Муртазаев И.С.-А., Межидов Д.А. Самоуплотняющиеся бетоны с использованием химических добавок на основе эфиров полиарилов и поликарбоксилатов. *Вестник ГГНТУ. Технические науки*. 2023;1(31):88–95. <https://doi.org/10.34708/GSTOU.2023.74.53.009>
- Murtazaev YuS-A, Sheina SG, Murtazaev IS-A, Mezhidov D.A. Self-sealing concretes using chemical additives based on polyacrylic esters and polycarboxylates. *Bulletin of GGNTU. Technical sciences*. 2023;Vol.XIV,1(31):88–95. (In Russ.) <https://doi.org/10.34708/GSTOU.2023.74.53.009>
18. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Ерофеев В.Т., Ерофеева И.В., Тараканов О.В., Кондращенко В.И. и др. Исследование трещиностойкости бетонов нового поколения. *Строительные материалы*. 2019;10:3–11. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-775-10-3-11>
- Travush VI, Karpenko NI, Erofeev VT, Erofeeva IV, Tarakanov OV, Kondrashenko VI, Kesariyskiy AG The study of crack resistance of new generation concrete. *Building Materials*. 2019;10:3–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-775-10-3-11>
19. Larsen OA, Samchenko SV, Naruts VV, Aleksandrova OV, Bulgakov BI. Environmental Aspects of Dismantling of old Buildings During the Reconstruction in Moscow. *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019*. 2019;19:115–122. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/6.2/S26.015>

Об авторах:

Любовь Ивановна Касторных, кандидат технических наук, доцент кафедры технологического инжиниринга и экспертизы в стройиндустрии Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ScopusID](#), [ORCID](#), likas9@mail.ru

Александр Викторович Каклюгин, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных материалов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ScopusID](#), [ORCID](#), kaklugin@gmail.com

Михаил Геннадиевич Холодник, кандидат технических наук, доцент кафедры технологического инжиниринга и экспертизы в стройиндустрии Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), xolodniak@yandex.ru

Денис Викторович Кузьменко, магистрант кафедры технологического инжиниринга и экспертизы в стройиндустрии Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), 89001270357@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Л.И. Касторных: разработка плана и проведение исследовательских работ.

А.В. Каклюгин: обработка экспериментальных данных.

М.Г. Холодник: обработка экспериментальных данных.

Д.В. Кузьменко: проведение экспериментов, подготовка иллюстраций.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Lyubov I. Kastornykh, Cand.Sci.(Eng.), Associate Professor of the Department of Technological Engineering and Expertise in the Construction Industry at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), likas9@mail.ru

Alexander V. Kaklyugin, Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Building Materials of the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation) [ScopusID](#), [ORCID](#), kaklugin@gmail.com

Mikhail G. Kholodnyak, Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technological Engineering and Expertise in the Construction Industry at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), xolodniak@yandex.ru

Denis V. Kuzmenko, Master's student of the Department of Technological Engineering and Expertise in the Construction Industry at the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ORCID](#), 89001270357@mail.ru

Claimed contributorship:

LI Kastornykh: development of a plan and conducting research.

AV Kaklyugin: processing of experimental data.

MG Kholodnyak: processing of experimental data.

DV Kuzmenko: conducting experiments, preparing illustrations.

Conflict of Interest Statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 30.04.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 17.05.2025

Принята к публикации / Accepted 30.05.2025